

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут енергозбереження та енергоменеджменту**

**Кафедра електропостачання**

«На правах рукопису»  
УДК 621.3.018.3

«До захисту допущено»

Науковий керівник кафедри

\_\_\_\_\_ С.П. Денисюк

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
спеціалізації Енергетичний менеджмент та енергоефективність**

**на тему: «Оцінювання впливу суб- та інтергармонік в електричних мережах»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ОН-62м

Коваленко Антон Володимирович

\_\_\_\_\_

Керівник:

д.т.н., проф. Волошко А.В.

\_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

ас. Прокопенко І.Д.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інститут енергозбереження та енергоменеджменту**  
**Кафедра електропостачання**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Науковий керівник кафедри

\_\_\_\_\_ С.П. Денисюк

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Коваленко Антон Володимирович**

1. Тема дисертації «Оцінювання впливу суб- та інтергармонік в електричних мережах»

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Волошко А.В.

затверджені наказом по університету від «20» березня 2018 р. №971-с

2. Термін подання студентом дисертації «18» травня 2018 року

3. Об'єкт дослідження: процес оцінювання якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання.

4. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати сучасний стан методів та засобів визначення інтергармонік у електричній мережі, проаналізувати вплив інтергармонік на економічну ефективність електроустаткування, розробити спосіб визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень.

5. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: діаграми основних методів визначення інтергармонік, діаграми виникнення інтергармонік, алгоритми формування інтергармонічних груп

6. Орієнтовний перелік публікацій

1) Волошко А.В., Лутчин Т.М., Коваленко А.В. Електромагнітна сумісність у системах Smart Grid / збірник матеріалів конференції X Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.)

2) Коваленко А.В. Застосування методів оцінки якості електроенергії для ефективного використання енергоресурсів / збірник матеріалів конференції V Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2018» (Київ 17-19 квітня 2018 р.)

7. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль

ас. Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання 12 березня 2018 року

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз актуальності теми та необхідності її дослідження	14.03.2018	
2	Дослідження існуючих стандартів щодо якості електроенергії	23.03.2018	
3	Вивчення електрообладнання яке спричинює наявність інтергармонік в електричній мережі	5.04.2018	
4	Визначення економічних наслідків на обладнання при впливі інтергармонік	15.04.2018	
5	Аналіз існуючих методів визначення інтергармонік	24.04.2018	
6	Розроблення способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень	2.05.2018	
7	Розроблення стартап-проекту	7.05.2018	
8	Висновки	10.05.2018	

Студент

Коваленко А.В

Науковий керівник дисертації

Волошко А.В.

## РЕФЕРАТ

У склад роботи входить чотири розділи, висновки, та перелік використаних джерел. Загальний обсяг становить 118 сторінок, у тому числі 103 сторінок основного тексту, 44 рисунків та 21 таблиць, а також переліку використаних джерел із 26 найменувань.

**Актуальність теми.** Електрична енергія використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, вона має комплекс специфічних властивостей, які приймають участь у створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. Кожний електроприймач застосовують для роботи при відповідних параметрах електричної енергії, тому для нормальної роботи необхідно забезпечити якість електричної енергії.

І оскільки енергозбереження відіграє значну роль у роботі підприємств, зазначмо основні причини втрати електроенергії на підприємствах:

- зовнішній несанкціонований відбір;
- внутрішнє несанкціоноване використання;
- паразитні втрати;
- нерівномірний розподіл навантаження;
- контроль якості електроенергії.

Однією зі складових виступає якість електроенергії. В загальному сенсі якість електроенергії – це основоположна сукупність властивостей електроенергії що визначають вплив на електрообладнання, прилади та пристрої й оцінюються показниками якості електроенергії.

Інтергармоніки, як одна зі складових якості електроенергії наразі є малодослідженою частиною. Наявність їх в мережі призводить до значних економічних втрат у виробництві, оскільки значно погіршуються показники якості напруги, наприклад з'являється асиметрія напруги чи спостерігається ефект флікеру. Через це, контроль цих показників є першочерговою задачею задля забезпечення сталого виробництва.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проведені у роботі відповідають прогнозованому розвитку науки і техніки у напрямку енергетика та енергоефективність відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

**Мета й завдання дослідження.** Розроблення способу визначення інетргармонічних підгруп при дослідженні впливу інтергармонік в децентралізованих системах електропостачання на якість електроенергії.

Основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан методів та засобів визначення інтергармонік у електричній мережі.
2. Проаналізувати вплив інтергармонік на економічну ефективність електроустаткування.
3. Розробити спосіб визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень .

**Об'єкт дослідження.** Процес оцінювання якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання.

**Предмет дослідження.** Методи та засоби оцінювання якості електричної енергії.

**Методи дослідження.** Математичні методи засновані на пакетних вейвлет-перетвореннях, у результаті яких отримуємо збалансоване бінарне дерево.

Ієрархарізація як метод задля побудови дерева рішень, яке упорядковує існуючі правила для співвідношення кожного об'єкту до вузла.

Методи обробки одномірних масивів для визначення та ідентифікації інтергармонічних груп.

Методи статистичної обробки даних для аналізування значень вузлів оптимального дерева для визначення порогових даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розроблено спосіб визначення інетргармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень, задля синхронізації з основною частотою.

**Практичне значення одержаних результатів.** Наразі дослідження пов'язані з визначенням та ідентифікацією інтергармонік набуває великого значення, але практичне застосування доволі є ускладненим через недосконалість нормативної бази та відсутність устаткування задовольняючого достатній рівень вимірювання.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень були оприлюднені на X Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.), а також на V Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2018»

**Публікації.** Була опублікована 1 стаття у збірнику матеріалів конференції X Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.), а також 1 тези у збірнику матеріалів конференції V Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2018» (Київ 17-19 квітня 2018 р.)

1) Волошко А.В., Лутчин Т.М., Коваленко А.В. Електромагнітна сумісність у системах Smart Grid / збірник матеріалів конференції X Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.)

2) Коваленко А.В. Застосування методів оцінки якості електроенергії для ефективного використання енергоресурсів / збірник матеріалів конференції V Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2018» (Київ 17-19 квітня 2018 р.)

У оформленні роботи були використані стандартні елементи текстового редактора Microsoft Word, а також застосовувалось графічне середовище Simulink у програмі Matlab.

**Ключові слова.** Інтергармоніки, параметри якості електроенергії, гармоніки, завади, флікери, асиметрія напруги, вейвлет-перетворення, пакетні вейвлети

## ABSTRACT

The work consists of four sections, conclusions, and a list of sources used. The total volume is 111 pages, including 96 pages of the main text, 37 figures and 18 tables, as well as the list of sources used from 26 titles in 3 pages.

**Actuality of theme.** Electric power is used in all spheres of human activity, it has a complex of specific properties that take part in the creation of other types of products, affecting their quality. Each electric appliance is used for work at the appropriate parameters of electric energy, therefore for the normal operation it is necessary to ensure the quality of electric energy.

And since energy saving plays a significant role in the work of enterprises, let us list the main reasons for the loss of electricity at enterprises:

- external unauthorized selection;
- internal unauthorized use;
- parasitic losses;
- uneven distribution of load;
- quality control of electricity.

One of the components is the quality of electricity. In the general sense, the quality of electricity is a fundamental set of electrical properties that determine the impact on electrical equipment, devices and devices and are evaluated by indicators of the quality of electricity.

Interharmonics, as one of the components of the quality of electricity, are currently under investigation. Their presence in the network leads to significant economic losses in the production, as voltage quality indicators deteriorate significantly, for example voltage asymmetry appears, or a flicker effect is observed. Because of this, monitoring these indicators is a priority task for sustainable production.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes.** The researches carried out in the work correspond to the predicted development of science and technology in the direction of energy and energy efficiency in accordance with the Law of Ukraine "On priority directions of science and technology development".

**The purpose and tasks of the study.** Development of the method of determination of intersurgical subgroups in the study of the influence of interharmonics in decentralized systems of electricity supply on the quality of electricity.

Main tasks of the research:

1. To analyze the current state of the methods and means of defining interharmonics in the electrical network.
2. To analyze the influence of interharmonics on the economic efficiency of the electrical equipment.
3. To develop a method for the determination of interharmonic subgroups based on the construction of the optimal structure of the binary tree of wavelet transformations.

**Object of study.** The process of estimating the quality of electric energy in decentralized power supply systems.

**Subject of study.** Methods and tools for assessing the quality of electric energy.

**Research methods.** Mathematical methods are based on packet wavelet transforms; in which we obtain a balanced binary tree.

Hierarchy as a method for constructing a decision tree that arranges the existing rules for the ratio of each object to the node.

Methods of processing one-dimensional arrays for the identification and identification of interharmonic groups.

Methods of statistical data processing to analyze the values of nodes of an optimal tree for determining threshold data.

**Scientific novelty of the obtained results.** The method of determination of intersurgical subgroups based on the construction of the optimal structure of the binary tree of wavelet transforms is developed, in order to synchronize with the main frequency.

The practical value of the results.

Currently, studies related to the identification and identification of interharmonics are of great importance, but the practical application is rather complicated due to the imperfection of the regulatory framework and the lack of equipment satisfying a sufficient level of measurement.



**Approbation of the results of the dissertation.** The results of the research were made public at the X International Scientific and Technical Conference "Power Engineering. Ecology. Man "(Kyiv, April 26-27, 2018), as well as at the V International Scientific-Technical and Educational-Methodical Conference "Energy Management: Status and Prospects of Development - PEMS'2018"

**Publications.** There was published 1 article in the collection of materials of the conference of the X International Scientific and Technical Conference "Energy. Ecology. Man" (Kiev, April 26-27, 2018), as well as 1 thesis in the collection of materials of the conference of the V International Scientific and Technical and Educational and Methodological Conference "Energy Management: State and Development Prospects - PEMS'2018" (Kyiv, April 17-19). 2018)

1) Voloshko A.V., Lutchin T.M., Kovalenko A.V. Electromagnetic Compatibility in Smart Grid Systems / Collection of Materials of the Conference of the Xth International Scientific and Technical Conference "Power Engineering. Ecology. Man "(Kyiv, April 26-27, 2018)

2) Kovalenko A.V. Application of methods for assessing the quality of electricity for the efficient use of energy resources / collection of materials of the conference of the V International Scientific and Technical and Educational and Methodological Conference "Energy Management: State and Development Prospects - PEMS'2018" (Kiev, April 17-19, 2018)

In the design work, the standard elements of the Microsoft Word editor were used, as well as the Simulink graphical environment in the Matlab program.

**Keywords:** interharmonics, energy quality parameters, harmonics, noise, flicker, voltage asymmetry, wavelet transform, wavelets pack

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	15
1.1 Основні параметри та нормативні документи, які визначають якість електричної енергії .....	15
1.2 Вплив наявності інтергармонік на економічну ефективність електроспоживання .....	23
1.3 Проблема визначення інтергармонік .....	40
1.4 Обґрунтування необхідності постійного моніторингу наявності інтергармонік в системах електропостачання .....	43
Висновки до розділу .....	44
2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ТА АЛГОРИТМУ СУБ- ТА ІНТЕРГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ БІНАРНОГО ДЕРЕВА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ .....	45
2.1 Електрообладнання, яке генерує інтергармоніки.....	45
2.2 Основні методи визначення інтергармонік .....	70
2.3 Розробка способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень .....	85
2.3.1 Дерево рішень, як один із методів аналізу інформаційних даних .....	85
2.3.2 Бінарне дерево ортогональних вейвлет-перетворень .....	85
2.3.3 Побудова оптимальної структури та алгоритму формування інтергармонічних груп.....	86
Висновки до розділу .....	91
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ ТА АЛГОРИТМУ СУБ- ТА ІНТЕРГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА	

ОСНОВІ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ БІНАРНОГО ДЕРЕВА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ .....	93
Висновки до розділу .....	98
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	99
Висновки до розділу .....	113
ВИСНОВКИ .....	114
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	116

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Електрична енергія використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, вона має комплекс специфічних властивостей, які приймають участь у створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. Кожний електроприймач застосовують для роботи при відповідних параметрах електричної енергії, тому для нормальної роботи необхідно забезпечити якість електричної енергії.

І оскільки енергозбереження відіграє значну роль у роботі підприємств, зазначмо основні причини втрати електроенергії на підприємствах:

- зовнішній несанкціонований відбір;
- внутрішнє несанкціоноване використання;
- паразитні втрати;
- нерівномірний розподіл навантаження;
- контроль якості електроенергії.

Однією зі складових виступає якість електроенергії. В загальному сенсі якість електроенергії – це основоположна сукупність властивостей електроенергії що визначають вплив на електрообладнання, прилади та пристрої й оцінюються показниками якості електроенергії.

Інтергармоніки, як одна зі складових якості електроенергії наразі є малодослідженою частиною. Наявність їх в мережі призводить до значних економічних втрат у виробництві, оскільки значно погіршуються показники якості напруги, наприклад з'являється асиметрія напруги чи спостерігається ефект флікеру. Через це, контроль цих показників є першочерговою задачею задля забезпечення сталого виробництва.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проведені у роботі відповідають прогнозованому розвитку науки і техніки у напрямку енергетика та енергоефективність відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

**Мета й завдання дослідження.** Розроблення способу визначення інтегрармонічних підгруп при дослідженні впливу інтергармонік в децентралізованих системах електропостачання на якість електроенергії.

Основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан методів та засобів визначення інтергармонік у електричній мережі.
2. Проаналізувати вплив інтергармонік на економічну ефективність електроустаткування.
3. Розробити спосіб визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень .

**Об'єкт дослідження.** Процес оцінювання якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання.

**Предмет дослідження.** Методи та засоби оцінювання якості електричної енергії.

**Методи дослідження.** Математичні методи засновані на пакетних вейвлет-перетвореннях, у результаті яких отримуємо збалансоване бінарне дерево.

Ієрархізація як метод задля побудови дерева рішень, яке упорядковує існуючі правила для співвідношення кожного об'єкту до вузла.

Методи обробки одномірних масивів для визначення та ідентифікації інтергармонічних груп.

Методи статистичної обробки даних для аналізування значень вузлів оптимального дерева для визначення порогових даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розроблено спосіб визначення інтегрармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень, задля синхронізації з основною частотою.

**Практичне значення одержаних результатів.** Наразі дослідження пов'язані з визначенням та ідентифікацією інтергармонік набуває великого значення, але практичне застосування доволі є ускладненим через недосконалість нормативної бази та відсутність устаткування задовольняючого достатній рівень вимірювання.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень були оприлюднені на X Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.), а також на V Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2018»

**Публікації.** Була опублікована 1 стаття у збірнику матеріалів конференції X Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.), а також 1 тези у збірнику матеріалів конференції V Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2018» (Київ 17-19 квітня 2018 р.)

1) Волошко А.В., Лутчин Т.М., Коваленко А.В. Електромагнітна сумісність у системах Smart Grid / збірник матеріалів конференції X Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ 26-27 квітня 2018 р.)

2) Коваленко А.В. Застосування методів оцінки якості електроенергії для ефективного використання енергоресурсів / збірник матеріалів конференції V Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2018» (Київ 17-19 квітня 2018 р.)

У оформленні роботи були використані стандартні елементи текстового редактора Microsoft Word, а також застосовувалось графічне середовище Simulink у програмі Matlab.

**Ключові слова.** Інтергармоніки, параметри якості електроенергії, гармоніки, завади, флікер, асиметрія напруги, вейвлет-перетворення, пакетні вейвлети.

## 1 ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Електрична енергія – продукт який за своїми особливостями відрізняється від будь-якого іншого продукту. Вона виробляється далеко від місця споживання, а крім точки споживання, впродовж кілометрів повітряних та кабельних ліній передавальної та розподільної мережі проходить через серію перетворень від одного рівня до іншого. Цей шлях призводить до погіршення якості електричної енергії.

1.1 Основні параметри та нормативні документи, які визначають якість електричної енергії

У сфері регулювання якості основна увага приділяється показникам якості електропостачання, ці показники регулюються за допомогою стандартів. До основних на даний час відноситься стандарт ГОСТ 13109-97, який однак є не єдиним стандартом що нормує показники якості електроенергії. Стандарт ДСТУ *EN 50160:2014* «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» (*EN 50160:2010, IDT*) був прийнятий згідно наказу Міністерства економічного розвитку від 20.05.2014 № 573. Цей стандарт є узгодженим з міжнародними та європейськими стандартами і набрав чинності від 01.10.2014р.

Стандарт *EN 50160:2010* прийнят у багатьох країнах ЄС. Він був розроблений Європейським комітетом зі стандартизації в галузі електротехніки *CENELEC* у 1995 році, а з грудня 2010 року, використовують його виправлене видання. Він визначає характеристики низької напруги і середньої напруги мережі. З точкою зору застосування *EN 50160* для встановлення мінімальних стандартів якості напруги, європейські регулятори вважають, що норма не цілком адекватна для захисту клієнтів. Цей стандарт визначає напругу розподілу битого розміру в точці входу в низьку напругу споживача та мережі середньої напруги в нормальних робочих умовах. Також у цьому стандарті описані характеристики напруги живлення не

призначені для використання в якості рівня електромагнітної сумісності або в якості граничного значення завад [1].

Метою цього стандарту є визначення та опис характеристики розподільної напруги з точки зору:

- частоти;
- розмірів;
- сигналу;
- симетрії напруги трифазних провідників.

Загалом цей стандарт, як зазначено у [2] описує характеристики електричної енергії через характеристики змінної напруги, це зумовлює необхідність мати постійну частоту, неспотворену синусоїдальну форму кривої та незмінність амплітуди, для використання електричної енергії.

До основних істотних відмінностей міжнародного стандарту *EN 50160: 2010* року від чинного в Україні ДСТУ ГОСТ 13109-97 відноситься:

- в *EN 50160: 2010* вказана та конкретна точка, в якій відповідно до договору на підключення споживача, повинні забезпечуватися характеристики напруги електропостачання. Цією точкою є точка приєднання споживача до електричної мережі ( «*supply terminal*»);

- в *EN 50160* зазначено конкретне значення номінального напруги електропостачання для мереж низької напруги - 230/400 В, яке відноситься до характеристик напруги, а не до показників якості напруги. [3]

Також до основних світових стандартів також можна віднести американський стандарт *IEEE Std519*. Він прийнятий у країнах Північної та Південної Америки, а також у деяких африканських країнах. У [4] зазначено, що основною відмінністю від європейських стандартів є те, що американський стандарт розглядає обмеження стосовно вищих гармонік току навантаження, які створюються її нелінійною частиною у точці загального підключення. Це викликає проблему розподілення відповідальності за погіршення якості електроенергії між споживачем і постачальником через обмеження рівнів вищих гармонік напруги у розподільчих мережах.



Основним стандартом для вимірювання гармонік і інтергармонік є *IEC 61000-4-7*, який був змінений з додаванням методології для вимірювання інтергармонік. Методом вимірювання як гармонік так і інтергармонік є використання перетворень Фур'є, з 10 або 12 перетвореннями, однак шаг у 5 Гц є недостатньо точним для відображення положення інтерграмонік як для 50 Гц так і для 60 Гц.

Якщо розглядати діючі стандарти за номінальними значеннями низької напруги то в країнах Євросоюзу в даний час діє уніфікований ряд номінальних напруг для електричних мереж відповідно до сьомого видання стандарту *IEC 60038: 2009 «IEC standard voltages»*. Завдяки цьому, з 2008 року в країнах Євросоюзу існує єдина стандартна напруга для низьковольтних розподільчих мереж загального призначення 230/400 В, яке безпосередньо вказано в міжнародному європейському стандарті *EN 50160: 2010*.

СРСР, а потім в Україні свого часу органами стандартизації були вжиті необхідні заходи для поступового «переходу» на уніфіковане з європейськими країнами номінальне значення напруги 230 В. Так, з 1993 року і по теперішній час в Україні діє міждержавний (для країн СНД) стандарт ГОСТ 29322-92 (МЕК 38-83) «Стандартні напруги», який передбачав поетапне «перехід» на стандартні фазні і лінійні напруги 230В і 400 В

В Україні також діє ще з часів СРСР стандарт ГОСТ 21128-83 «Системи електропостачання, мережі, джерела, перетворювачі і приймачі електричної енергії. Номінальні напруги до 1000 В », останні поправки до якого вносилися в 1990 році. Область застосування цього стандарту поширюється на системи електропостачання, мережі, джерела, перетворювачі і безпосередньо приєднуються до них приймачі електричної енергії і встановлює для них ряди номінальних значень постійних і змінних напруг. [3]

Основними типами спотворення в електричних мережах є [5]:

- вищі гармоніки, частота яких кратна основній частоті;
- інтергармоніки – гармоніки, частота яких некрата основній частоті;
- коливання напруги;

- короткочасні провали напруги, амплітуда яких перевищує 10 % і може досягати 100 % (перерва живлення);
- несиметрія напруги (у трьохфазних системах);
- сигнали систем управління, які передаються по дротам ліній електропередач;
- зміни частоти;
- компоненти постійного струму (різні перетворювачі).

Для дослідження якості електроенергії необхідно контролювати такі параметри за [6]:

- встановлене відхилення напруги  $\delta U_y$ ;
- розмах зміни напруги  $\delta U_t$ ;
- доза флікера  $P_t$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю  $K_{0U}$ ;
- відхилення частоти  $\Delta f$ ;
- тривалість провалу напруги  $\Delta t_{\Pi}$ ;
- імпульсна напруга  $U_{\text{імп}}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер } U}$ .

При визначенні значень деяких показників якості електроенергії використовують такі допоміжні параметри електричної енергії:

- частоту повторення змін напруги  $F \delta U_t$ ;
- інтервал між змінами напруги  $\Delta t_{i,i+1}$ ;
- глибину провалу напруги  $\delta U_{\Pi}$ ;
- частість появи провалів напруги  $F_{\Pi}$ ;
- тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди  $\Delta t_{\text{імп } 0,5}$ ;
- тривалість тимчасового перенапруги  $\Delta t_{\text{пер } U}$ .

Однак за джерелом впливу основні параметри якості електроенергії поділяються на три групи [6].

До першої групи належать відхилення частоти  $\Delta f$  і встановлене відхилення напруги  $\delta U_y$ . Ці показники не залежать від окремих електроприймачів на підприємстві чи в побуті через невелику потужність. Основний вплив на значення цих параметрів надає сумарна потужність генераторів електростанцій енергосистеми вцілому.

До другої групи належать параметри якості електроенергії джерелами викривлень яких є окремі споживачі електроенергії. До цих параметрів відносяться коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ , коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ , коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2U}$ , коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю  $K_{0U}$ , розмах зміни напруги  $\delta U_t$  та доза флікера  $P_t$ , які характеризують несинусоїдальність форми кривої напруги, несиметрію та коливання напруги [6].

До третьої групи належать ПЯЕ, що характеризують випадкові електромагнітні явища й електротехнологічні процеси в системі електропостачання. Вони охоплюють тривалість провалу напруги  $\Delta t_n$ , імпульсна напруга  $U_{\text{імп}}$  та коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер } U}$ , які виникають у більшості випадків у результаті комутацій або розрядів блискавки в лінії електропередач [6].

Кожний з цих показників характеризує будь-яку властивість електричної енергії [7]. Далі розглянемо до яких властивостей відноситься той чи інший показник якості електроенергії.

### **Відхилення напруги**

Відхилення напруги визначається різницею між дійсним  $U$  і номінальним  $U_{\text{ном}}$  значенням напруги. У якості дійсного значення напруги  $U$  у трьохфазних мережах приймається напруга прямої послідовності основної частоти [4].

Параметрами якості електроенергії, що характеризують відхилення напруги є встановлене відхилення напруги  $\delta U_y$ , для якого за [2] встановлені наступні норми:

- нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги  $\delta U_y$  на виводах приймачів електричної енергії дорівнюють відповідно  $\pm 5$  і

$\pm 10\%$  від номінальної напруги електричної мережі за ГОСТ 721 і ГОСТ 21128 (Номінальна напруга);

- нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ і більше повинні бути встановлені в договорах на користування електричною енергією між енергопостачальною організацією та споживачем з урахуванням необхідності виконання норм цього стандарту на виводах приймачів електричної енергії. Для визначення нормально допустимих і гранично допустимих значень використовують відповідні нормативні документи, які затверджені в установленому порядку [2].

Основними причинами виходу цього показника за норми є:

- технологічні зміни струмового навантаження за добу чи сезон;
- зміна потужності компенсуючих приладів і генераторів;
- зміна параметрів і схеми електричної мережі.

Через зазначені фактори виникає відхилення напруги, яке значно впливає на роботу електродвигунів. Перш за все це викликає перегрів ізоляції викликане зниженням напруги на затискачах двигуна через що зменшується реактивна потужність намагнічування, і при тій же споживаній потужності зростає струм двигуна. Через збільшення реактивної потужності в наслідок збільшення напруги на виводах двигуна, виникає необхідність її компенсації [7].

### **Коливання напруги**

До коливань відносять швидкі зміни діючого значення напруги, що відбуваються зі швидкістю 1-2% в секунду і більше [4], і характеризуються наступними показниками якості електроенергії:

- розмах зміни напруги  $\delta U_t$ ;
- доза флікера  $P_t$ .

При різких змінах струмового навантаження відбувається настільки ж різка зміна еквівалентних параметрів ЕП, в результаті чого має місце модуляція в часі амплітуд і фаз вимушених складових миттєвого струму як основний, так і кратних їй вищих несучих частот. У деяких випадках можливе також поява вільних складових.

Все це природним чином призводить до збільшення сумарних активних втрат в мережі. Найбільш чутливими до коливань напруги є освітлювальні прилади і електронна техніка. Через коливання напруги виникає миготіння ламп розжарювання [8].

Основними причинами коливань напруги є використання електроприймачів зі швидкозмінними режимами роботи, що супроводжується різкими змінами потужності (головним чином реактивної) навантаження, і виникають частіше за все у таких електроприймачів як: тягові підстанції, приводи реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати, електролізні установки.

### **Несинусоїдальність напруги**

Вона характеризується за [2] наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ .

Основними причинами зміни показників є використання нелінійних електроприймачів. Це такі прилади як: вентильні перетворювачі, силове електрообладнання з тиристорним управлінням, дугові й індукційні електропечі, люмінесцентні лампи, установки дугового і контактного зварювання, перетворювачі частоти а також побутова техніка. Ці пристрої під час роботи створюють потік вищих гармонік, які потрапляють у зовнішню мережу. Загалом це призводить до додаткових втрат [8].

### **Несиметрія напруг**

Несиметрії напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю  $K_{0U}$ ;

За [2] нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0% відповідно.

Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до чотирьох

провідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ рівні 2,0 і 4,0% відповідно [2].

Основними причинами виходу цих показників за нормальні значення є використання несиметричних або однофазних електроприймачів, це: дугові сталеплавильний печі, тягові навантаження залізниць на змінних струмі, електрозварювальні агрегати, освітлювальні установки, однофазне комунально-побутові навантаження.

Погіршення умови роботи електроприймачів і взагалі всіх елементів мережі виникає через несиметрію струму навантаження, який протікає у елементах системи електропостачання, викликаючи в них несиметричне падіння напруги. Внаслідок цього на виводах ЕП з'являється несиметрична система напруг.

### **Відхилення частоти**

Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти  $\Delta f$ , для якого встановлено такі норми:

- нормально допустиме значення відхилення частоти рівні на  $\pm 0,2$  Гц;
- гранично допустиме значення відхилення частоти рівні на  $\pm 0,4$  Гц.

Причина виходу показника за межі норм полягає в зміні величин генерується і споживаної потужності в енергосистемі [2].

### **Провал напруги**

Провал напруги характеризується показником тривалості провалу напруги  $\Delta t_{\text{п}}$ , для якого за [2] встановлена наступна норма:

- гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно дорівнює 30 с. Тривалість автоматично усуваного провалу напруги в будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається витримки часу релейного захисту та автоматики.

### **Імпульс напруги**

Імпульс напруги [2] характеризується показником імпульсної напруги  $U_{\text{імп}}$ . Значення імпульсних напруг для грозових і комутаційних імпульсів, що виникають в електричних мережах енергопостачальної організації.

### Тимчасове перенапруження

Тимчасове перенапруження [2] характеризується показником коефіцієнта тимчасової перенапруги  $K_{\text{пер } U}$ .

Останні три показники можливо віднести до характеристик різних електромагнітних перехідних перешкод, що виникають при електромагнітних перехідних процесах, які мають місце в електричних мережах в результаті виникнення різних видів коротких замикань, ударів блискавок в елементи мережі, дій систем релейного захисту і автоматики, комутацій різного електроустаткування, обривів нульового проводу в мережах 0,4 кВ. Крім цього провали наруги зумовлюються людським фактором і помилковими спрацьовуваннями засобів захисту і автоматики [8].

### 1.2 Вплив наявності інтергармонік на економічну ефективність електроспоживання

В цілому, вплив інтергармонік і вищих гармонік на електричне обладнання, обладнання зв'язку та системи телемеханіки однакові, але в деяких випадках ефект інтергармонік може бути більшим, ніж вищими гармоніками, частково з точки зору необхідного рівня перешкодозахисту.

Як правило, найбільш актуальні параметри якості електроенергії пов'язані з формою напруги. Вони включають в себе:

- величину та баланс трифазних напруг;
- перехідні коливання;
- індивідуальні та загальні напруги гармонік та інтергармонік.

І оскільки інтергармоніки спостерігають як одне з додаткових навантажень до гармонік, розглянемо стандартні проблеми які виникають при появі як гармонік так і відповідно інтергармонік. Для цього перш за все розглянемо більш детально гармоніки.

Стандарт IEC 61000-2-1 визначає інтергармоніки наступним чином:

Між гармоніками напруги та струму частоти живлення можна спостерігати подальші частоти, які не є цілими частотами фундаментальних. Вони можуть з'являтися як дискретні частоти або як широкосмуговий спектр.

Найпоширенішим індексом для оцінки впливу гармонік є Total Harmonic Distortion (THD) - це показник ефективного значення гармонічних компонентів спотвореної форми сигналу. Це потенційна теплова вартість гармонік відносно фундаментальної. Цей індекс можна використовувати як для напруги, так і для струму.

На рисунку 1.1 зображено цей аддитивний ефект для однієї фази та його шкідливий вплив на напругу 50 Гц (або струм) [9].

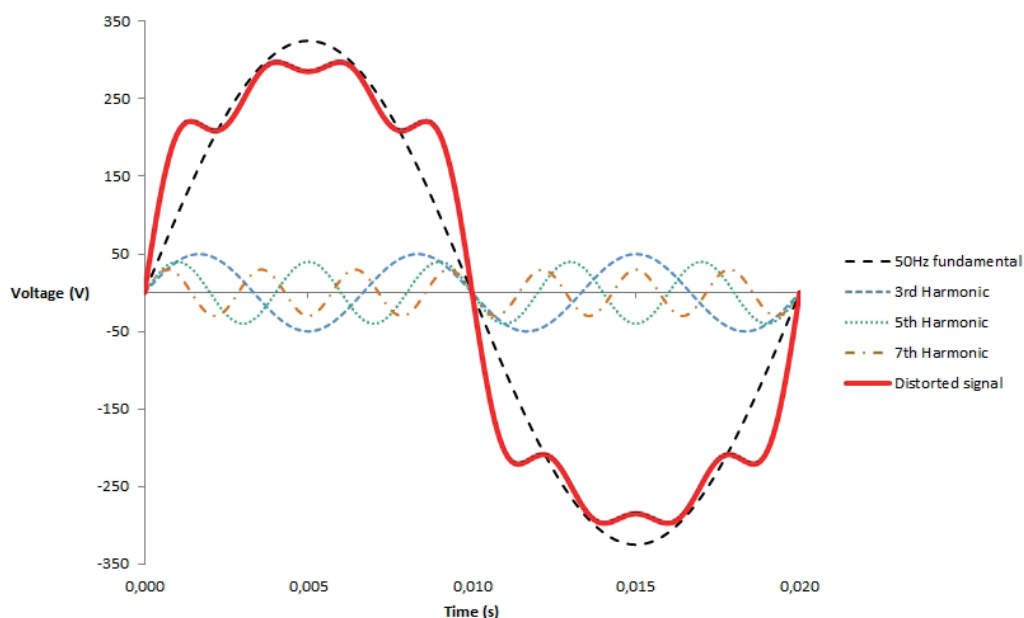
Для симетричних форм сигналу можуть з'являтися лише "непарні" гармоніки (множинні 3, 5, 7 і т.д., основної частоти), як на прикладі рисунком 1.1.

Для асиметричних форм сигналу може з'явитися частина з непарних або парних фундаментальних (множина 2, 4, 6 і т. Д.). Також компоненти постійного струму можуть з'являтися в асиметричних сигналах, які представлені як сигнали 0 Гц.

Наслідками до яких може призвести гармоніка при впливі на обладнання, на електроустановки або на обох, є:

- додані втрати ефективності в системі, що складається з електроустановок та обладнання.
- неочікувані резонанси.
- порушення в електронному обладнанні, що спричиняє "логічні" недоліки в цифрових схемах.
- небажане перевантаження проводів (або необхідність збільшення величини) для трансформаторів.
- несправності двигунів та генераторів.
- небажані спрацьовування вимикачів або відключення запобіжників.





- Рисунок 1.1 – Приклад розкладання складного спотвореного сигналу, як додавання 50 Гц основного сигналу 3, 5 і 7 гармонік (150 Гц, 250 Гц, 350 Гц відповідно).

Генератори, що виробляють електричну енергію, генерують дуже близьке наближення до синусоїдального сигналу. Проте в системі є навантаження та пристрої, які мають нелінійні характеристики та призводять до гармонійного спотворення сигналів напруги та струму. Оскільки в мережах присутнє більше нелінійних навантажень, ці хвилі стають більш спотвореними.

Просування і широке використання двигунів з регулюванням швидкості, електронних пристроїв, мікропроцесорів тощо в багатьох областях значно спричинили спотворення напруги та струму у силовій та розподільчій системі. Це зумовило необхідність кращого розуміння впливу гармонічних спотворень на захист, контроль та вимірювання в енергетичних системах, промисловому обладнанні та навіть приладах утримання будинку.

І оскільки основна причина генерації гармонік - це нелінійне навантаження, то гармонічні спотворення можуть генеруватися з джерел в мережі електропостачання, таких як трансформатори, реактори, генератори змінного струму та гармонічно спотворені струми навантаження через повний опір живлення, тобто це навантаження, що робить миттєво пропорційний струм на прикладену напругу,

через що його опір підтримується постійним протягом усього періоду чергування. Це спотворення має тенденцію бути стаціонарним для даного навантаження і змінюється при зміні навантаження системи. На додаток до цього, існують гармоніки, що генеруються перемиканням перехідних процесів та блискавками. Вони мають короточасну тривалість всього лише частку секунди, але можуть сильно руйнувати систему електропостачання та чутливу техніку. Інші джерела гармонік розташовані в установках споживачів. Це створює несинусоїдальні струми навантаження, які можуть взаємодіяти з елементами схеми в межах електричної установки або в зовнішній системі живлення, погіршуючи напругу живлення та опосередковано впливаючи на інших споживачів, підключених до однієї і тієї ж системи. Найбільшим джерелом гармонік в промисловому середовищі, безсумнівно, є силова електроніка. Інші джерела включають електродугові печі, розрядне освітлення, електричні машини та трансформатори. Для суспільного електропостачання синусоїдальної напруги 50 або 60 Гц це також означатиме чистий синусоїдальний струм.

У конденсаторах з'являються наступні завади :

- реактивна потужність збільшується завдяки гармонійним напругам;
- діелектричні втрати збільшуються, тому відбувається додаткове нагрівання;
- відмова батарей конденсатора від діелектричного розриву або перевантаження реактивної потужності;
- очікувана тривалість життя зменшується;
- може відбуватися резонанс, що призводить до гармонійного збільшення;
- може відбутися перенапруга [10].

У порівнянні з джерелами живлення, ефекти гармонічних напруг та струмів гармоніки значно виражені на генераторах, через те, що їх джерело повного опору як правило, в три-чотири рази більше, ніж у трансформаторів. Основним впливом гармонік напруги та струму є збільшення обігріву машини за рахунок збільшення втрат заліза та втрат міді, оскільки вони залежать від частоти і збільшуються зі збільшенням гармонік. Ефектність машини, таким чином, негативно впливає на зв'язок із гармонічно спотвореним джерелом живлення. Гармонічні струми в

обмотках також можуть генерувати звуковий шум. Крутний момент, який виробляється електродвигунами, також негативно впливає при підключенні до спотвореного живлення. Це може запобігти плавному пуску та інші небажані ефекти, таке як не досягнення двигуном робочої швидкості. Щоб зменшити ефект від гармонічного нагріву, кількість генераторів, які постачають нелінійні навантаження, повинна бути зменшена. Крім того, наявність компонент гармонічної послідовності з нелінійним навантаженням викликає локалізовані пульсації нагрівання та крутного моменту з крутовими коливаннями [11].

Частина з того, що може бути можливою причиною після появи гармонік, генератори самі можуть впливати на інших гармонійних джерел, з точки зору втрат ефективності, перегріву, зниження потужності. Однією з основних причин є високий постійний опір генераторів, які легко передаватимуть поточні гармонічні спотворення в гармонічні спотворення напруги (тобто впливають на інші навантаження, що постачаються з цього джерела). Для блоку двигунів ми називаємо їх як навантаження електричної установки, що перевищує джерела напруги.

Але прямі наслідки гармонік як для двигунів, так і для генераторів в основному однакові:

- основні втрати (залізо) збільшуються за допомогою гармонік, викликаних вихровими струмами (збільшенням втрат з квадратом частоти) та гістерезисом.
- втрати міді, пропорційні як  $THDi (I_{rms}^2 \cdot R)$ , так і частоті.
- негативні послідовності гармонік, мають ефект сили обертання проти крутного моменту, тому вони можуть викликати моторні вібрації, додавання тепла, які необхідно усувати.

Якщо розглядати окремо генератори то гармоніки викликають в них:

- нагрів ротора (в циліндричних роторних синхронних генераторах);
- виробництво пульсуючого або коливального моментів, що включають торсійні коливання елементів ротора та згинання турбін.

Частотні двигун змінного струму у найпростішому вигляді використовують однофазні або трифазні мости для перетворення змінного струму в постійний струм. Тиристори потім використовуються для отримання трифазного змінного частотного

виходу, який підключається до трифазного мотора. Швидкість двигуна пропорційна застосованій частоті. На рисунку 1.2 показаний основний перетворювач трифазних частот, а на рис. 1.3 показано гармонійний спектр струму. За допомогою цього типу перетворювачів 3 та 9 струми гармоніки значно знижуються, але 5 та 7 збільшуються.  $THDi$  у цьому прикладі було встановлено 65,5%. Зменшення 3-ї та 9-ї гармонік має знак струму в нейтральній трифазній системі, оскільки вони нульової фазової послідовності та додаються в нейтральну. Зменшення 5-ї та 7-ї гармонік має наслідки для машин, що обертаються, оскільки 5-у має негативну фазову послідовність, що генерує негативний крутний момент, а 7-у має позитивну фазову послідовність, що створює позитивний крутний момент [3].

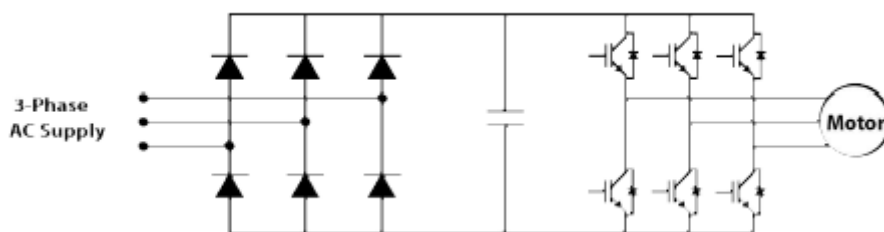


Рисунок 1.2 – Основний 6-імпульсний перетворювач частоти

Більш складні електронні схеми, такі як 12-імпульсний паралельно з'єднаний перетворювач частот, показаний на рисунку 1.4, можуть значно знизити гармонічний вміст струму навантаження, як це видно на рисунку 1.5. Проте невеликі дисбаланси в напрузі живлення можуть викликати значні гармоніки [3].

Гармонічні спотворення підвищують втрати в асинхронних електродвигунах змінного струму аналогічно трансформаторам і викликають підвищений нагрів через додаткові втрати міді та втрати заліза (вихровий струм і втрати гістерезису) в обмотці статора, ланцюгах ротора та ланцюгах ротора. Ці втрати посилюються, особливо на частотах вище 300 Гц.

І оскільки погіршення якості електроенергії витікає з кожного етапу: виробництва, передачі і розподілу, зумовлює необхідність забезпечення належної якості для економічної і тривалої експлуатації електроприладів у різних галузях економіки.

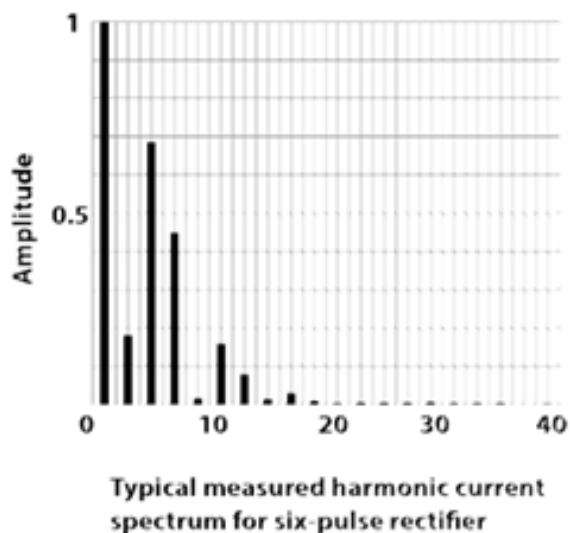


Рисунок 1.3 – Гармонійний поточний спектр базового шестиімпульсного перетворювача частоти.

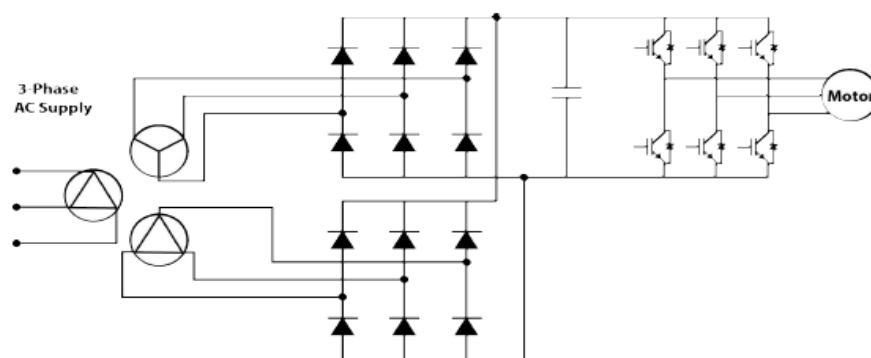


Рисунок 1.4 – 12-імпульсний паралельно з'єднаний перетворювач частоти.

Витікання магнітних полів, викликаних гармонічними струмами в кінцевих обмотках статора та ротора, створюють додаткові безвихідні залежні втрати від вихрового струму. Істотні втрати заліза можуть також вироблятися в асинхронних двигунах з перекрученими роторами внаслідок високочастотних індукованих струмів та швидких змін потоку (тобто через гістерезис) у статорі та роторі.

Вплив гармонік напруги та струму на асинхронні машини проявляється двома різними способами. Перше явище стосується впливу гармонік на момент обертання: розрахунки (а також вимірювання) показують, що ефект гармонічних спотворень від 10% до 20% практично незначний. Це стосується постійного обертаючого моменту,

а також початкового моменту. З іншого боку, було помічено, що спотворення гармонік викликає розвиток коливального крутного моменту. Це пов'язано з взаємодією гармонічних струмів та магнітного поля основної частоти. Ці язики мають відносні амплітуди, які приблизно пропорційні відносним амплітудам відповідних гармонічних струмів. (Інакше кажучи, якщо гармонійні струми мають по відношенню до фундаментального струму амплітуду 10%, коливальний момент буде мати, по відношенню до основного моменту, аналогічну амплітуду). Середні обертальні моменти, що експлуатуються або починаються, не впливають, але коливальний момент може в кінцевому підсумку створювати механічні коливання та як наслідок зношувати підшипники.

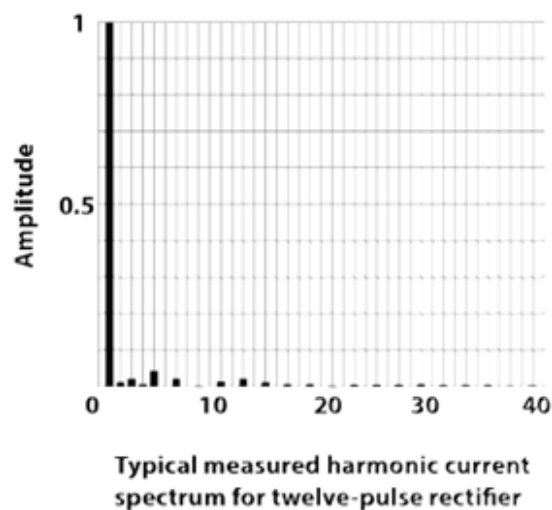


Рисунок 1.5 – Хвильова діаграма та гармонійний аналіз 12-імпульсного паралельно підключеного перетворювача частоти.

Гармоніки напруги та струму живлення викликають додаткові втрати в машинах. Деякі з цих втрат можна підсумувати наступним чином [10]:

- первинні втрати  $I_{rms}^2 \cdot R$ . Гармонічні струми сприяють загальному вхідному діючому значенню струму.
- вторинні  $I_{rms}^2 \cdot R$  втрат
- основні втрати, пов'язані з гармонійними основними потоками. Ці основні втрати відбуваються при високих частотах, але потоки сильно загасають за допомогою індукованих вторинних струмів.

- втрати через косих потоки витоку. Ці втрати виникають, якщо між первинними та вторинними провідниками є відносний нахил. При 50 або 60 Гц втрати зазвичай невеликі, але вони можуть бути помітними на гармонічних частотах. Оскільки гармоніка часу магнетично з'єднує обмотки статора та ротора, втрати коефіцієнта витікання утворюються в обох обмотках.

- втрати внаслідок витікання потоку. Як і у випадку збиткових втрат, ці втрати відбуваються в кінцевих областях обмоток статора та ротора та є функцією гармонічної частоти.

- космічна гармоніка  $M.M.F$ . Втрати існували за часом гармонійні струми. Це відповідає втратам, які, у випадку фундаментального компонента струму, називаються високочастотними збитковими навантаженнями.

Додаткові втрати в залізі практично незначні (кілька % від звичайних втрат у залізі, які загалом становлять близько 30% від загальних втрат). Навпаки, необхідно враховувати додаткові втрати в міді за рахунок гармонічних струмів, що циркулюють в обмотках ротора та статора.

Надмірне нагрівання може знизити змащення підшипника і спричинити згорання підшипника. Гармонічні струми також можуть призвести до несучих струмів, що, однак, можна уникнути за допомогою ізолюваного підшипника, дуже поширеної практики, яка використовується в змінному струмі. Перегрів накладає значні обмеження на ефективне життя асинхронного двигуна. Протягом підвищення на  $10^{\circ}\text{C}$  вище номінальної температури, термін служби моторної ізоляції може бути зменшений на 50%. Ротори білячої клітки, як правило, можуть витримувати більш високі температури порівняно з роторами. Обмотки двигуна, особливо якщо ізоляція класу В або нижче, також схильні до пошкодження завдяки високому рівню  $dv/dt$  (тобто швидкості підйому напруги), такі, як ті, які пов'язані з лінією надрізання і пов'язаним з нею дзвоном у зв'язку з протіканням гармонійних струмів. Середній розподіл втрат у асинхронних двигунах від гармонік буде: у обмотці статора – 14%; у ланцюгу ротора – 41%; торцеві зони – 19%; асиметричні пульсації – 26%. У синхронних двигунах розподіл буде аналогічний за винятком втрат на асиметричні пульсації.

Компоненти гармонійної послідовності також негативно впливають на асинхронний двигун. Компоненти позитивної послідовності (наприклад, 7, 13, 19 ...) сприятимуть виробленню крутного моменту, тоді як компоненти негативної послідовності (5, 11, 17 ...) будуть діяти проти напрямку обертання, що призведе до пульсацій крутного моменту. Компоненти нульової послідовності (тобто трипленові гармоніки) стаціонарні і не поворотні, тому будь-яка зв'язана з ними гармонічна енергія розсіюється як тепло. Величина крутових пульсацій, сформованих внаслідок цих компонент гармонічної послідовності, може бути значною та викликати проблеми крутіння вібрації вала.

На рисунку 1.6 зображено залежність  $THDu$  при змінюванні шляхом регулювання кута тиристора приводу зі змінною швидкістю, зберігаючи постійну швидкість та навантаження, від гармонійних втрат, які як видно з рис збільшились [12].

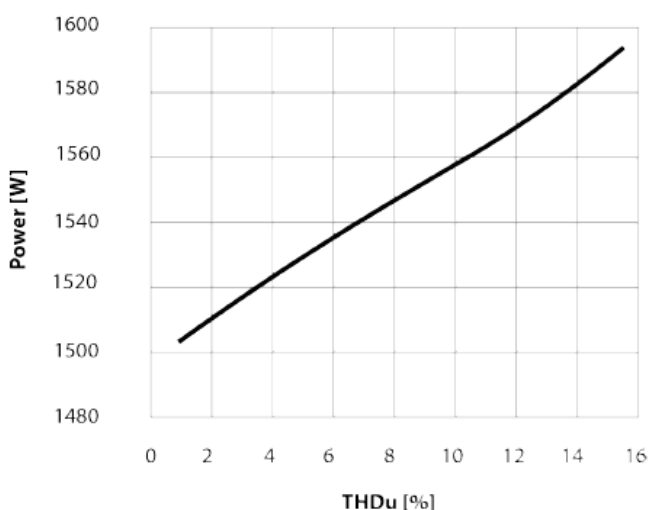


Рисунок 1.6 – Втрати індуктивного двигуна і  $THDu$

Обертання, що виробляються 5-ї та 7-ою космічними гармоніками, може призвести до падіння загального обертаючого моменту, який виробляється машиною при запуску, і призводить до незадовільної продуктивності. На рисунку 1.7 показано перетин між обертаючим моментом навантаження та результуючим крутним моментом через вплив 7-ї гармоніки. Це призведе до припинення навантаження в точці перетину, а двигун не досягне повної швидкості роботи.



Високий пусковий струм, що приймається асинхронним двигуном, звичайно становить від восьми разів повного струму навантаження. Це має типову тривалість від двадцяти до тридцяти секунд, і двигун розроблений таким чином, щоб протистояти цьому перевантаженню. Однак у випадку, якщо двигун швидко не досяг повної швидкості, двигун перегріється через комбінацію зменшеної вентиляції та тривалого пуску струму. П'ята гармоніка має негативну послідовність фаз, і тому крутний момент, вироблений 5-м гармонічним струмом, буде діяти проти позитивного моменту, який виробляється основним струмом. Цей негативний крутний момент зменшує ефективність двигуна [3].

5-й та 7-й гармонічні моменти також можуть поєднуватись, щоб створювати механічні коливання між двигуном і навантаженням, збуджуючи механічну резонансну частоту системи, створюючи тим самим механічні сили та вібрацію високої напруги. 5-ий та 7-ий гармонічні струми, індуковані в роторі, можуть поєднуватись з утворенням 6-го гармонічного струму і аналогічним чином 12-го та 13-го, щоб отримати 12-й струм гармоніки і так далі для гармонік вищого порядку. Це призводить до збільшення нагріву та зменшенню пульсуючого моменту. Чистий ефект може бути зменшенням ефективності до 90-95%, коли двигуни піддаються гармонійному спотворенню струму напруги живлення до 5%  $THDu$ .

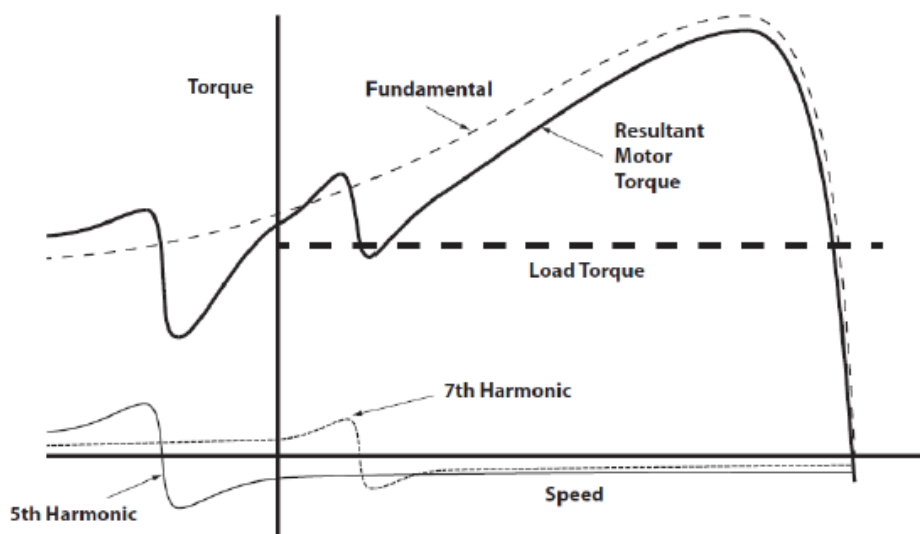


Рисунок 1.7 – Характеристики обертання для індукційного двигуна.

Силові трансформатори складаються, в основному, з ізольованих обмоток, встановлених на силіконові сталеві стрижні. Трансформатор, який працює на більш високій щільності, потребуватиме менше магнітного матеріалу. Тому з економічної точки зору, сердечник трансформатора призначений для роботи в насиченій області при високій щільності. Несинусоїдальний струм намагнічування має значний компонент третьої гармоніки. Струм буде містити основні і всі непарні гармоніки, з яких третя гармоніка є переважаючою. При номінальній напрузі, третя гармоніка в збудливому струмі може становити 5 - 10% фундаментальної і 150% номінальної напруги [3].

В мережах змінного струму згідно *IEEE Std C57.110-2008*, втрати трансформатора можна охарактеризувати як:

- втрати обмотки  $I^2R$ ;
- втрати на обмотки на вихрові струми
- бродячі втрат

Гармоніки в трансформаторах можуть спричинити підвищення звукового шуму. Крім того, струмові гармоніки зумовлюють збільшення втрат міді та втрат, що призводить до збільшення втрат на сталі. Наявність гармонік напруги та струму має тенденцію до збільшення значень діючого значення струму. *IEEE Std C57.110-2008* пропонує ліміт  $THDi$  для трансформаторів 5% та максимальних перенапруг стаціонарного стану від 5 до 10%.

Збитки з обмотки  $I^2R$  будуть збільшуватися, якщо значення діючого значення струму навантаження збільшиться через наявність гармонічних компонентів. Крім того, близькість гармонічних струмів збільшать опір змінного струму обмотки з наступним ефектом на втрати обмотки  $I^2R$ .

Ті ж самі ефекти втрат сердечника і втрати міді (обмотки), описані для двигунів вище, з'являються у випадку трансформаторів. Існує також потенційний ризик резонансу між індуктивністю трансформатора та поданими ємнісними навантаженнями на частотах гармонік.

Сердечники ламінованих трансформаторів також можуть вібрувати на певних частотах гармонік, викликаючи звуковий шум та перегрів. Обмотки трансформатора

можуть впливати і на ефект близькості: два близькі провідники, що несуть змінний струм у тому ж напрямку, викликають більше магнітного потоку в області, близькій до обох провідників, що спричиняє розподіл струму до більш віддалених ділянок цих двох провідників. Цей ефект зменшеної "ефективної" площі пропорційний частоті, тому для гармонік більш високого порядку опір змінного струму провідників обмотки буде додатково збільшуватися, тобто спричиняти додатні втрати.

Якщо узагальнити усі впливи гармонік на трансформатори то отримуємо:

- збільшення беззмістовних (вихрострумові) втрат через несинусоїдальність струмів навантаження, які зростають пропорційно квадрату струму навантаження та квадрату частоти;

- збільшення втрат гістерезису;

- можливий резонанс між індуктивністю трансформатора та ємністю лінії.

Якщо розглядати електронні пристрої, такі як випрямлячі, інвертори та циклоконвертери, то очевидно, що вони чутливі до точки перетину нульової напруги сигналу, можуть мати вплив гармонічних спотворень. Вплив на перетворювачі полягає у витісненні природної точки комутації. Гармоніки напруги діють на трансформатори живлення, пристрої управління та керування, характеристики вихідної напруги, сигнал вихідної напруги та допоміжні пристрої.

На рисунках 1.8 і 1.9 наводяться деякі приклади виникнення явищ.

На рисунку 1.8 показано, як гармоніки напруги живлення витісняють точку природної комутації перетворювача. Контрольна апаратура тиристорів повинна забезпечувати додатковий запас безпеки для обліку цього явища:

- якщо тиристори використовуються як випрямлячі, кут нагрівання повинен бути довшим, ніж кут, який знижує продуктивність обладнання.

- у разі експлуатації в якості інвертора, необхідно забезпечити більший резерв, щоб уникнути помилок комутації, які можуть мати внутрішнє коротке замикання. Це обмежує область домену регулювання.

Рисунок 1.9 пов'язаний з регуляторами, які дуже часто вважають нульовим перетином напруги як точкою відліку. Більш важливі пристрої обладнані

гармонічними фільтрами. Останні відносно чутливі до гармонік, особливо якщо вони сильні.

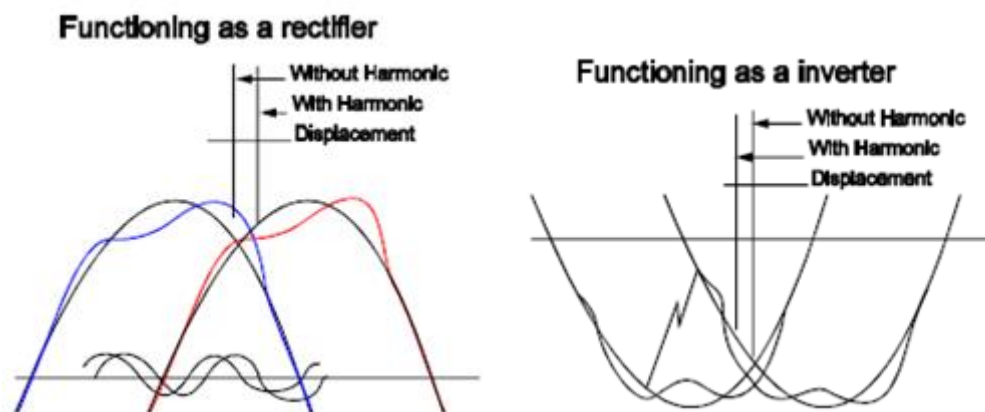


Рисунок 1.8 – Вплив гармонік на струм і напругу у електронних перетворювачах

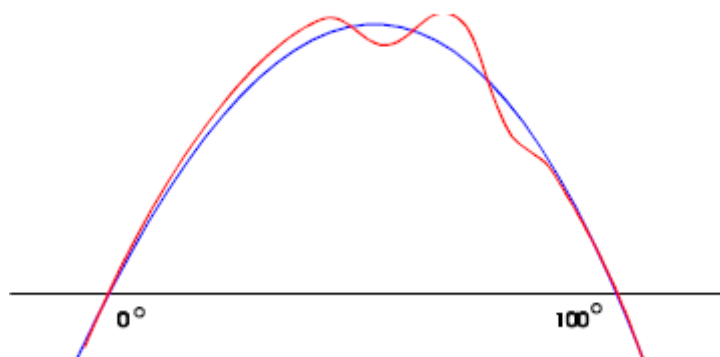


Рисунок 1.9 – Вплив напруги гармонік на регулятори

Необхідно встановити зв'язок з загальним гармонічним спотворенням напруги, яка повинна розглядатися як нормально допустима, інакше необхідно визначити особливі умови. Загальне гармонічне спотворення напруги не повинно перевищувати 10%. Кожна індивідуальна гармоніка напруги не повинна перевищувати 5% до 13-ї гармоніки, а потім знизитися до 1% при 5000 Гц (основна частота 50 Гц)

Розглянемо вимірювальну техніку. На практиці існує лічильник, який працює в ланцюгах стандартної частоти та напруги з невеликим або без будь-яких спотворень сигналу. Ці умови, як правило, тісно апроксимуються в практичних

системах, а помилки в вимірюванні енергії через наближення є незначними. Проте зростання промислового застосування електронного та високочастотного обладнання, що призводить до гармонійного спотворення струму навантаження, викликало занепокоєння з приводу продуктивності лічильників, що використовуються для вимірювання напруженості енергії.

Викривлення струму може спричинити неточну роботу індукційних вимірювачів. Гармонічні напруги або струми знизять здатність лічильника. Типові реакції на знижуючий ефект гармонік різних фазових кутів і амплітуд у котушках напруги та струму показані на рисунку 1.10.

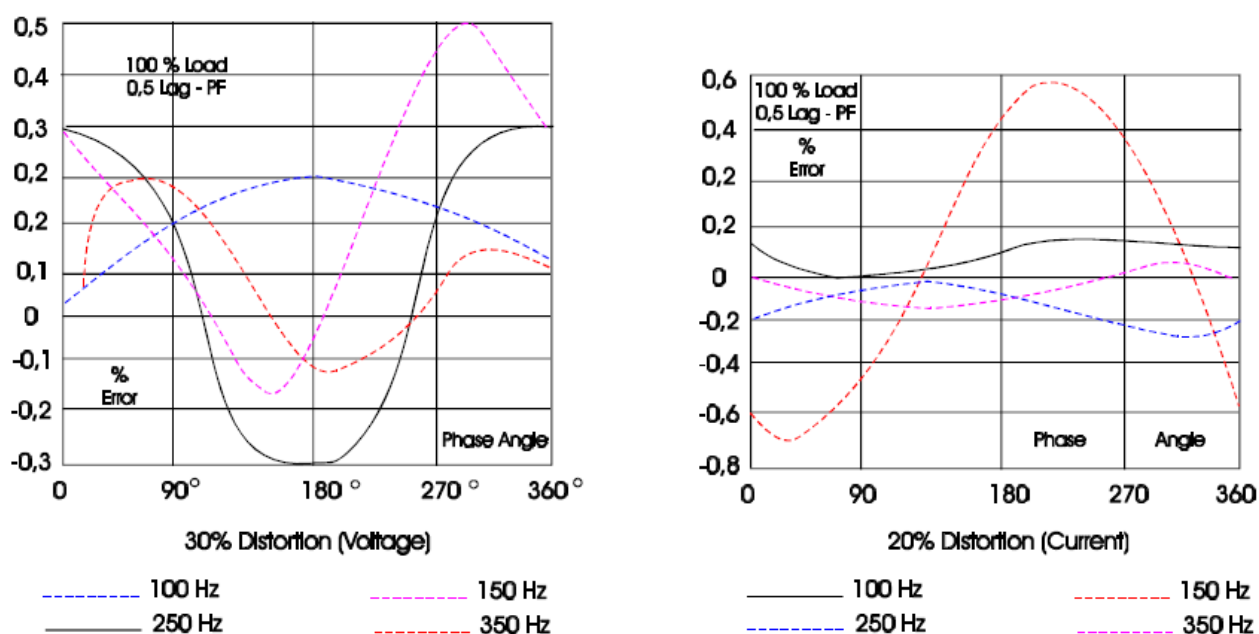


Рисунок 1.10 – Діаграми гармонічних напруг та струмів

Вплив гармонік на точність лічильників виявляється трьома способами:

- лічильники є частотними, причому негативна похибка збільшується з частотою.

З того факту, що індуктивність котушки напруги збільшується, зменшується магнітне поле та обертаючий момент:

- магнітні поля котушки напруги лічильника не є лінійними і містять деякі гармонічні компоненти за рахунок компенсаційних пристроїв. Вважається, що в

будь-якому випадку буде розвиватися додатковий крутний момент, навіть якщо в розподільній мережі немає гармонік напруги та струму. Ці помилки є негативними.

- лічильники не вимірюють компонент енергії через постійний струм.

Однак ці негативні помилки є слабкими.

Абсолютні, середні або пікові вимірювальні прилади, які відкалібровані в діючому струмі, не підходять для вимірювання несинусоїдальних напруг та струмів. Зчитування вимірювального коефіцієнта усереднення може бути на 40% нижче дійсного значення струму через спотворену форму сигналу. Стандартний індикатор енергії кВт год, який звичайно використовується для вимірювання електроенергії, може бути високим до 6%, коли рівень гармонік високий.

Якщо узагальнити стандартний вплив гармонік так і відповідно інтрергармонік на електрообладнання можна отримати наступну таблицю 1.1:

Таблиця 1.1 – Зведена таблиця впливу гармонік так і відповідно інтрергармонік на електрообладнання

Обладнання	Вплив
Провідники	Збільшення діючого струму Збільшення додаткових втрат
Конденсатори	Збільшення реактивної потужності Діелектричні втрати Вихід з ладу батарей, та зменшення терміну придатності Резонанси Перенапруга
Вимірювальна техніка	Похибки у роботі індукційних вимірювачів Похибки у вимірюванні дійсного значення струму до 40% Похибки у вимірюванні електроенергії до 6%

Продовження таблиці 2.3

Обладнання	Вплив
Трансформатори	Підвищення звукового шуму Збільшення втрат на міді Збільшення втрат на сталі Збільшення значень діючого значення струму Перегрів Збільшення втрат гістерезису Резонанси Вихід з ладу
Електронні пристрої	Інвертори – помилки комутації Витіснення природної точки комутації
Генератори	Нагрів ротора Виробництво пульсуючого або коливального моментів
Двигуни	Моторні вібрації Втрати на сталі Втрати на міді Генерування звукових шумів Виникнення коливального крутного моменту Втрати: у обмотці статора – 14% у ланцюгу ротора – 41% торцеві зони – 19% асиметричні пульсації – 26% (у синхронних двигунах розподіл аналогічно за винятком асиметричних пульсацій)

### 1.3 Проблема визначення інтергармонік

Як було зазначено, електротехнічні пристрої генерують у мережу завади, одними з яких є грамоніки – спектральні компоненти на частотах, які є цілими кратними компонентами основної частоти змінного струму. Однак окрім цих існують також інші – не цілі кратні, які називаються інтергармоніками. Зазвичай інтергармоніки спостерігають як одне з додаткових навантажень до гармонік. Такими навантаженнями є статичні перетворювачі частоти, синхронні каскадні перетворювачі, прилади з регульованою швидкістю для індукційних чи синхронних двигунів, печі чи інше термічне обладнання, усі ці навантаження не будуть працювати з частотою синхронною до основної частоти. І окрім стандартних проблем, які виникають при появі гармонік, перегрів чи зниження корисного ресурсу, виникає багато інших: значні термічні ефекти; низькочастотні коливання механічної системи, миготіння світла, завади сигналів керування і захисту, перевантаження високою частотою пасивного паралельного фільтру, телекомунікаційні завади, акустичні збурення, насичення трансформатора струму, синхронні коливання, коливання напруги, несправності систем дистанційного управління, помилкове спрацювання тиристорної апаратури, зменшення строку служби асинхронних двигунів. Ці явища можуть також статися якщо інтергармоніка має низьку амплітуду.

Гармоніки та інтергармоніки при аналізуванні форми сигналу визначаються в умовах спектральних компонентів у квазіустійкому стані в певному діапазоні частот. Таблиця 1.2 надає їх математичні визначення [13].

Таблиця 1.2 – Спектральні компоненти форм сигналу (частоти  $f$ )

Гармоніки	$f = nf_1$ де $n$ - ціле число більше нуля
Компоненти постійного струму	$f = nf_1$ для $n = 0$
Інтергармоніки	$f \neq nf_1$ де $n$ - ціле число більше нуля
Субгармоніки	$f > 0$ Гц і $f < f_1$



$f_1$  = основна частота напруги (основна гармоніка)

Через наявність інтергармонік у мережі ускладнено моделювання і вимірювання спотворених сигналів, що пов'язано з низкою факторів: дуже низька зацікавленість у дослідженні у порівнянні з гармоніками; непостійність їх частот і амплітуд; змінність періодичності хвиль; дуже велика чутливість до явища спеткрального витоку. Однак через погіршення мереж викликане інтергармоніками спостерігається збільшення інтересу серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії.

Існує два основних механізми для виникнення інтергармонік.

Перший - це генерація компонентів у бічних смугах частоти живлення та її гармонік в результаті зміни їх величин і/або фазових кутів. Це викликано швидким змінами струму в обладнанні та установках, що також може бути джерелом коливань напруги. Порушення створюються навантаженнями, які працюють у перехідному стані, як постійно, так і тимчасово, або, у багатьох інших випадках, коли відбувається амплітудна модуляція струмів і напруг. Ці заворушення мають багато в чому випадковий характер, залежно від змін навантаження, властивих процесам та устаткуванню, що використовується.

Другий механізм - це асинхронне перемикання (тобто не синхронізовано з частотою енергосистеми) напівпровідникових пристроїв у статичних перетворювачах. Типовими прикладами є циклоконвертори та перетворювачі з імпульсною широтною. Інтергармоніки, створені ними, можуть бути розташовані в будь-якому місці спектру по відношенню до гармонік напруги живлення [14].

У багатьох випадках обидва механізми відбуваються одночасно.

Інтергармоніки можуть генеруватися на будь-якому рівні напруги і переносяться між рівнями, тобто інтергармоніки, створені в системах високої напруги і середньої напруги, вбудовуються в систему низької напруги та навпаки. Їх величина рідко перевищує 0,5% напруги основної гармоніки, хоча можуть виникати і більш високі рівні в умовах резонансу.

Основними джерелами цих порушень є:

- дугові навантаження
- електроприводи зі змінним навантаженням
- статичні перетворювачі, зокрема прямі та непрямі перетворювачі частоти
- пульсаційне управління.

Інтергармоніки можуть також бути викликані коливаннями, що виникають, наприклад, в системах, що складаються з серії або паралельних конденсаторів або коли трансформатори піддаються насиченню та під час процесів комутації.

Оскільки гармоніки завжди синхронні до основної частоти, то сигнал буде мати постійні середньоквадратичні, за умови, що містить лише їх, однак інтергармоніки є асинхронними до основної частоти, і за їх наявності, сигнал буде змінювати пікові і середньоквадратичні значення під час циклу з частотою  $\omega_i$ , яка буде огибатись з частотою коливання  $\omega_f$ , яку можливо визначити за формулою:

$$\omega_f = |\omega_i - \omega_k| \quad (1.1)$$

де  $\omega_k$  – частота гармоніки найбільш близької до частоти  $\omega_i$ .

Через чутливість людського зору до миготіння світла на частоті 8 Гц, інтергармоніки на цій дистанції можуть спричиняти значне погіршення зору. На рисунку 1.11 зображена форма сигналів  $\sin(2\pi 60t) + a \sin(2\pi f_i t)$ , де  $a = 0,3$ ,  $f$  дорівнює 186 и 174 Гц відповідно. Можна побачити, що оминаючи осцилограми демонструють коливання 6 Гц, які визивають миготіння, якщо світлове навантаження чутливе до такої зміни пікового значення [14].

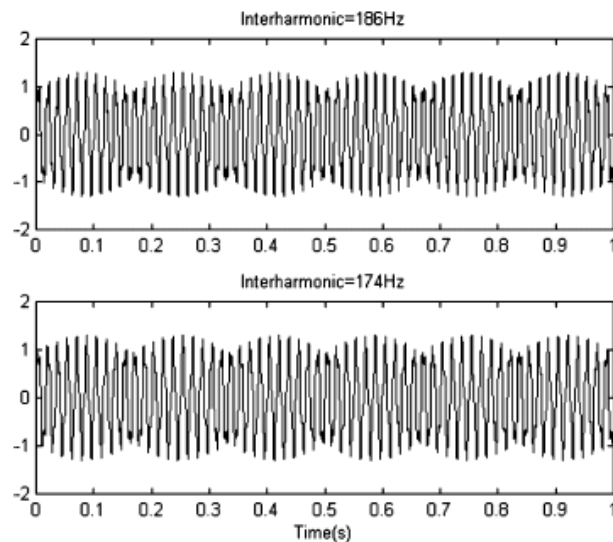


Рисунок 1.11 – Ефект флікеру спричинений інтергармоніками

#### 1.4 Обґрунтування необхідності постійного моніторингу наявності інтергармонік в системах електропостачання

І оскільки інтергармоніки спричинюють погіршення якості електричної енергії розглянемо економічні втрати, яких можна позбутись за допомогою впровадження методик постійного моніторингу наявності інтергармонік в електричній мережі.

Загальна потужність трансформатора  $W_{\Sigma}$  у 5 разів перевищує загальну потужність генераторів електростанції  $W_E$ . В Україні  $W_E = 50.000$  МВА. Таким чином,  $W_{\Sigma} = 50 \cdot 5 = 250$  ГВт.

Відповідно до усередненої оцінки інституту "Енергосетьпроект", щорічний провал трансформаторів  $\Delta W_T$  в результаті додаткового зносу ізоляції через низьку якість електроенергії складає 20%, за умови, що більше 75% трансформаторів працюють на потужності понад 50%. Отже,  $GW$

$$\Delta W_T = 0.2 \cdot 0.75 \cdot W_{\Sigma} = 0.15 \cdot 250 = 37.5 \quad (1.2)$$

Витрати, пов'язані з заміною трансформаторів:  $37500 \cdot 0,25 = 9375$  млн. грн/рік або  $9375/8 = 1,17$  млрд. доларів/рік.

Електромотори (електроприводи) споживають приблизно 70% всієї виробленої електроенергії  $S_E$ . У 2012 році це значення було  $S_E \approx 200$  млрд. кВт\* год.  $S_M = 0,7 \cdot S_E = 0,7 \cdot 200 = 140$  млрд. кВт \* год.

Значення втрат  $\Delta S_M$ , пов'язані з ефектом низької якості потужності при пошкодженні електродвигунів  $\Delta S_M = 0,2 \cdot S_E = 140 \cdot 0,2 = 28$  млрд. кВт \* год.

Вартість додатково споживаної потужності (0,5 грн/(кВт \* год)):  $S_M'' = 28 \cdot 0,5 = 14$  млрд. грн/рік = 1,75 млрд дол/рік

Вартість річних втрат у електричних мережах (12% за даними 2012 р.):  $200 \cdot 0,12 \cdot 0,5 = 12$  млрд. грн/рік = 1,5 млрд дол/Рік.

Вартість повних електромагнітних втрат електроенергії:  $S_\Sigma = 1,17 + 1,75 + 1,5 = 4,42$  млрд доларів.

Таким чином, оціночну величину електромагнітних втрат в електричних мережах України можна взяти як 4,4 млрд доларів/рік.

Давайте визначимо технологічну складову передбачуваних втрат, пов'язаних із перегріванням або обмеженням постачання з ймовірністю  $q = 0,05$ , враховуючи значення системного провалу  $\lambda_s = 0,1$ /рік. Ймовірні значення технологічної складової втрати  $\Delta S_{prob}$  будуть:  $\Delta S_{prob} = 0,05 \cdot 0,1 \cdot 200 = 1$  млрд. кВт \* год / рік.

Враховуючи величину специфічних втрат  $Y_0$  для промисловості та житлово-комунального господарства  $Y_0 = 0,3$  долари / кВт \* год, імовірна вартість технологічної складової очікуваних втрат складе  $S_{prob} = 1 \cdot 0,3 = 0,3$  млрд. доларів/рік

Орієнтовна вартість загальних втрат становить  $S_\Sigma + S_{prob} = 4,42 + 0,3 = 4,77$  млрд. доларів/рік.

Або з округленням отримуємо  $S_\Sigma + S_{prob} \approx 5$  млрд. доларів/рік

Отже були розглянуті складові втрат електричної мережі, яких за рахунок моніторингу наявності інтергармонік, можна позбутись за для надійного електропостачання [15].

### Висновки до розділу

1. В результаті аналізу діючих стандартів показників рівня якості електричної енергії, було визначено, що високими проблемними зонами показників рівня якості

електричної енергії з точки зору впливу на споживачів електричної енергії є виникнення інтергармонік які можуть збільшити спотворення напруги і призвести до перевантаження або порушення роботи обладнання споживача. Проведено аналіз основних показників якості напруги відповідних стандартів, за рахунок чого були зроблені висновки щодо впливу цих показників якості на відповідні властивості електроенергії.

2. Через вивчення останніх публікацій визначено основну сутність інтергармонік і був зроблений висновок, зведений у таблицю 1.1, щодо впливу інтергармонік на електричне обладнання.

3. За рахунок даних щодо втрат зроблено висновки про необхідність моніторингу інтергармонік задля мінімізації втрат в електричній мережі.

## 2 РОЗРОБКА СПОСОБУ ТА АЛГОРИТМУ СУБ- ТА ІНТЕРГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ БІНАРНОГО ДЕРЕВА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ

Виникнення інтергармонік і вищих гармонік залежить від багатьох факторів, у високовольтних мережах це зумовлено не лише впливом потужних нелінійних споживачів, а й неконтрольованим впливом, коронними розрядами, грозовими явищами і аварійними режимами ліній електропередачі. У низьковольтних мережах основний фактор виникнення інтергармонік і вищих гармонік є нестаціонарні процеси і нелінійні характеристики окремих електроприймачів, таких як зварювальні апарати, керований електропривод, комп'ютерна і інша електронна техніка. Значна частина цих споживачів генерує в мережу вищі гармоніки, серйозним чином загострюючи ситуацію з якістю електроенергії в низьковольтних мережах. Тому в умовах насиченості зазначених мереж нелінійними електроспоживачами домінуючим фактором погіршення якості електроенергії стає несинусоїдальність струмів і напруг. За класифікацією завад, що була приведена вище вони є систематичними, гармонічними, кондуктивними завадами [16].

### 2.1 Електрообладнання, яке генерує інтергармоніки.

Електричне або магнітне явище, яку було створене будь-яким джерелом в просторі або провідному середовищі і здійснюють небажаний вплив на стан електроприймачів, такий як функціонування, ефективність використання, втрати, старіння ізоляції який називають електромагнітною завадою. Носіями цих заваж виступають постійні або змінні за часом значення напруги, струму, електричного заряду або магнітного потоку.

Існують деякі класифікації завад [17] за ознаками. Вони діляться: на просторові і кондуктивні в залежності від шляху розповсюдження завад, на випадкові (ймовірні) і регулярні (систематичні) за передбачуваністю часу появи і форми. Перешкоди з мережі живлення змінного струму можна поділити на

імпульсні (короткочасні) і тривалі за допомогою яких при дослідженні електромагнітої обстановки можливо уявити у вигляді кількісних характеристик тривалих і імпульсних завад. До тривалих перешкод відносять відхилення напруги від номінального значення тривалістю більше 5 мс, що перевищують допустимі межі зміни в бік збільшення або зменшення, також до тривалих завад відносять провали напруги, викликані, наприклад, спрацьовування автоматичного повторного включення або автоматичного включення резерву, при цьому самі тривалі перешкоди лежать в межах 10 секунд. До розряду завад не будуть ставитися тільки відключення (аварійні або робочі), пов'язані з подальшим ручним включення напруги. До імпульсних перешкод відносять імпульси напруги різної полярності, що накладаються на нормальний рівень миттєвого значення синусоїди або постійної напруги тривалістю від часток наносекунди до одиниць мілісекунд.

На поодинокі, періодичні, гармонійні і шуми завади поділяють за характером протікання процесу за часом. Поодинокі завади зазвичай викликані комутацією мереж і електроприймачів, короткими замиканнями, статичними або атмосферними розрядами або іншими процесами, що викликають короткочасні незалежні один від одного обурення струму і напруги в мережі. Періодичні завади виникають через імпульсно-циклічні навантаження потужних електроприймачів. Гармонічні завади виникають в потужних нелінійних електроспоживачах при обмеженій потужності мережі живлення. Гармонічні і періодичні завади спричиняють виникнення несинусоїдальності напруги [17].

Такі трифазні навантаження як керовані електроприводи, різні інвертори, в тому числі, зварювальні випрямлячі інверторного типу генерують у мережу потужну п'яту і сьому гармоніки, за рахунок яких форма споживання струму значно спотворюється, коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої струму становить при цьому  $K_I = 80 - 90\%$ . Значне погіршення якості електроенергії спричиняється великою розповсюдженістю таких однофазних випрямних навантажень, які генерують у мережу третю і кратні їй гармоніки струму і доводячи загальний, коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої струму до  $K_I = 120 - 150\%$ .

Як зазначено у [17] ці споживачі відносно мережі живлення є значним однофазним нелінійним навантаженням і мають випадкові графіки навантаження. Через обмеження магнітного зв'язку між первинною і вторинною обмотками розподільного трансформатора запобігається розповсюдження інтергармонік і вищих гармонік у високовольтну мережу живлення, у наслідок чого вони циркулюють у низьковольтній мережі. Також у мережі спостерігається несиметрія навантажень за фазами і несиметрія струмів, і через поздовжньо активно-індуктивний опір мережі несинусоїдальний характер кривої вхідного струму зазначених електроприймачів викликає спотворення напруги живлення, які є фактором взаємовпливу інтергармонік і вищих гармонік в мережах низької напруги.

Однак, якщо перейти до основних джерел виникнення як інтергармонік так і вищих гармонік у мережах низької напруги – це насамперед споживачі електроенергії, які мають у своєму складі випрямлячі з потужним ємнісним фільтром. Це так звані перетворювачі з безтрансформаторним входом або, по міжнародній термінології, *AC / DC Switch Mode Power Supply (SMPS)*.

Випрямляч – це прилад призначений для перетворення змінного однофазного чи трьохфазного струму будь якої частоти у постійний струм, напруга и величина якого також може бути різною.

Зазвичай у випрямлячів задані наступні параметри:

$U_d$  – середнє значення випрямленої напруги;

$I_d$  – середнє значення випрямленого струму;

$q$  – коефіцієнт пульсації вихідної (випрямленої) напруги випрямляча.

$$q = \frac{U_{d(n)m}}{U_d} \quad (2.1)$$

де  $U_{d(n)m}$  - амплітуда гармонійної складової  $n$ -го порядку випрямленої напруги.

Замість  $q$  може бути задана хвилястість  $\omega$  кривої випрямленої напруги; під  $\omega$  розуміють:



$$\omega = \frac{U_{dд}}{U_d} \quad (2.2)$$

Де  $U_{dд}$  – діюче значення випрямленої напруги.

У деяких випадках, коли навантаження містить індуктивність, коефіцієнт пульсацій  $q$  і хвилястість  $\omega$  задаються не відносно напруги, а для випрямленого струму. Тоді коефіцієнт пульсацій:

$$q_t = \frac{I_{d(n)m}}{I_d} \quad (2.3)$$

де  $I_{d(n)m}$  - амплітуда гармонійної складової  $n$ -го порядку випрямленого струму;

$$\omega_t = \frac{I_{dд}}{I_d} \quad (2.4)$$

де  $I_{dд}$  - діюче значення випрямленого струму;

$P_d = U_d I_d$  - потужність випрямленого струму при ідеальному згладжування.

Іноді в якості необхідної задається величина  $P_d$ .

Випрямляч повинен забезпечувати відсутність радіозавад, не здійснювати вплив на лінії зв'язку і сигналізації, також необхідно мінімізація спотворення первинного струму і напруги. Тому при дотриманні усіх вимог щодо випрямлячів, також актуальне питання щодо впливу на первинну мережу і живлення від неї потужних випрямлячів при відносно обмеженій потужності мережі живлення змінного струму [18].

В загальному [19] вигляді випрямляч будується на основі діодів і тиристорів, а в окремих випадках на основі силових транзисторів, і представляє собою прилад з перетворювального трансформатора 1, випрямної схеми (установки) 2,

згладжувального фільтра 3, пристроїв управління і захисту 4 і автоматичного регулювання 5, схема якого зображена на рисунку 2.1.

Загалом за [21] випрямлячі поділяються на випрямлячі струму і випрямлячі навантаження. У обох випадках у якості вентилів використовують діоди і транзистори, хоча у випрямлячах напруги також можуть застосовуватися замикаючі тиристори. У випрямлячах струму струм на вході протікає в одному напрямку, а значення напруги на виході можуть змінювати полярність, на відміну від випрямлячів напруги, у яких усе відбувається навпаки - напруга на виході не змінює полярність, а струм на виході може змінювати напрямок.

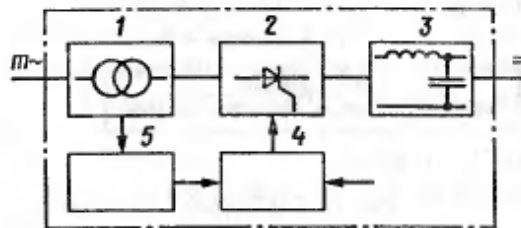


Рисунок 2.1 – Структурна схема випрямляча

Форму кривої первинного струму можливо представити прямокутною або ступінчатою, якщо розглядати її як ідеальний зладжений випрямлений струм, без комутації. Число ступенів зростає відповідно до збільшенням числа фаз випрямлення, що зображено для різної кількості чисел фаз випрямлення на рисунку 2.2.

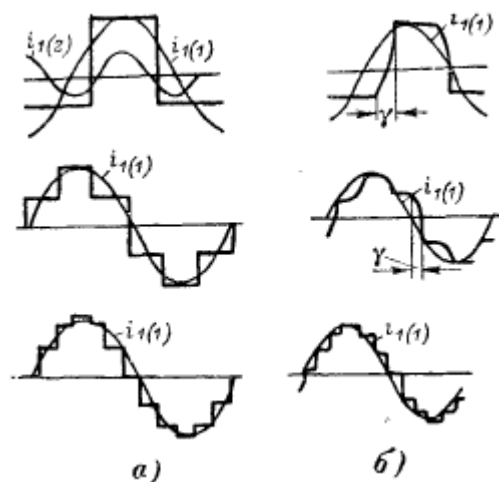


Рисунок 2.2 – Форми кривих первинних струмів

а – без урахування комутації;

б – з урахуванням комутації.

Якщо розглядати розкладання кривих первинного струму вентильних перетворювачів для шестипульсацийних схем випрямлення, які зображено на рисунку 2.3, то там окрім парних налічуються ряди непарних гармонік.

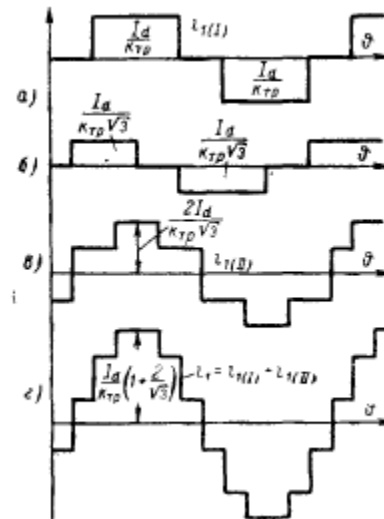


Рисунок 2.3 – Первинні струми в обмотках трансформатора

а – при з'єднанні зіркою;

б – при з'єднанні трикутником;

в – первинний струм у лінійному проводі при з'єднанні трикутником;

г – сума лінійних струмів.

Несинусоїдальність первинного струму, і як наслідок падіння напруги несинусоїдальної форми викликає спотворення первинної напруги.

На стороні випрямленої струму порядок гармонійних складових випрямленої напруги кратний числу основних пульсацій в випрямленій напрузі.

$$n = kp \quad (2.5)$$

де  $n$  - порядок гармонійних;  $k$  - послідовний ряд цілих чисел.

### Перетворювачі частоти

Перетворювачі частоти це пристрої за допомогою яких існує можливість перетворювати змінну напругу однієї частоти на змінну напругу іншої частоти [22]. Також якщо перетворювачі частоти призначені для частотно-регульованих електроприводів, вони також застосовуються для перетворення електроенергії, яка поступає з мережі змінного струму, в електроенергію змінної, за заданими законами, частоти і напруги. Розрізняють декілька видів перетворювачів частоти [20]:

- Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму.
- Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком.
- Перетворювачі частоти з проміжною ланкою змінного струму.

### **Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму**

Схема цього перетворювача частоти, яка зображена на рисунку 2.4, складається з керованого чи некерованого випрямляча (В), який випрямляє змінну напругу живлячої мережі, з  $LC$ -фільтра (Ф), на якому фільтрується напруга та автономного інвертору (АІ), який виконує функцію регулювання частоти. Будь-який розглянутий раніше інверторів може використовуватись у ролі АІ. Останнім часом найбільш розповсюдженні перетворювачі частоти на основі автономних інверторів напруги з широтно-імпульсним регулюванням або з широтно-імпульсною модуляцією. Такі перетворювачі дозволяють регулювати частоту вихідної напруги як вгору так і вниз в широкому діапазоні. Однак, ці перетворювачі частоти мають значний недолік: двохразове перетворення енергії, що призводить до зменшення ККД перетворювача.

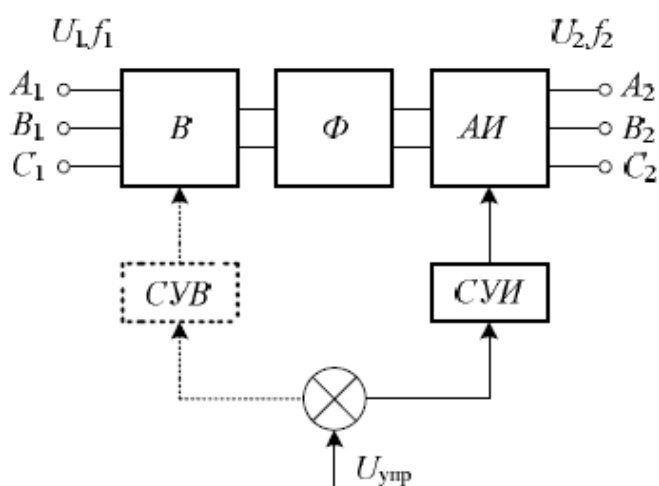


Рисунок 2.4 – Перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму

### Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком

Існують два види перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком [20]:

Першим є трьохфазно-однофазний перетворювач частоти з безпосереднім зв'язком з природною комутацією тиристорів. Схема цього перетворювача подібна до схеми керованого випрямляча з нульовим виводом трансформатора. Однак основною відмінністю є логіка управління яка ґрунтується на тому, що при почерговому відкритті вентильних груп створюється змінний струм у навантаженні. Позитивний напівперіод вихідного напруги формується при почерговій подачі відчиняючих імпульсів на тиристори групи I, негативний при подачі відчиняючих імпульсів на тиристори групи II. Регулювання частоти здійснюється за рахунок зміни кількості пульсацій напруги в напівхвил вихідної напруги. Регулювання діючого значення здійснюється зміною кута відмикання вентилів.

Як видно з рисунку 2.5, частота у перетворювачі частоти регулюється дискретно. Для забезпечення плавності регулювання частоти необхідно застосовувати паузи між включенням і виключенням груп тиристорів. Тривалість паузи повинна бути більше часу відновлення замикаючих властивостей тиристора, діаграми струмів надані на рисунку 2.6.

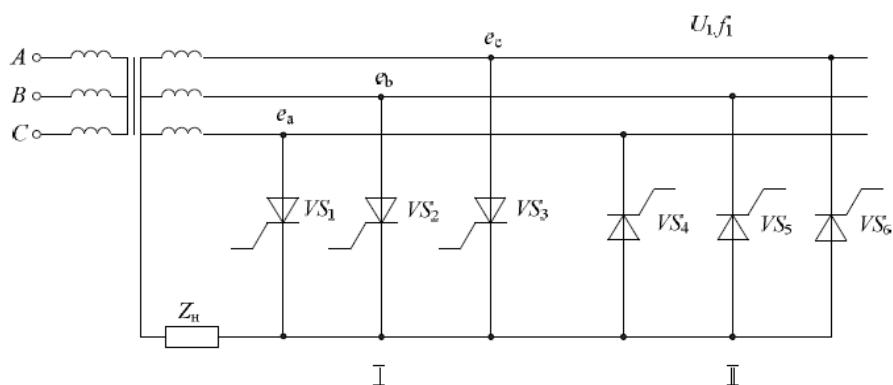


Рисунок 2.5 – Перетворювач частоти

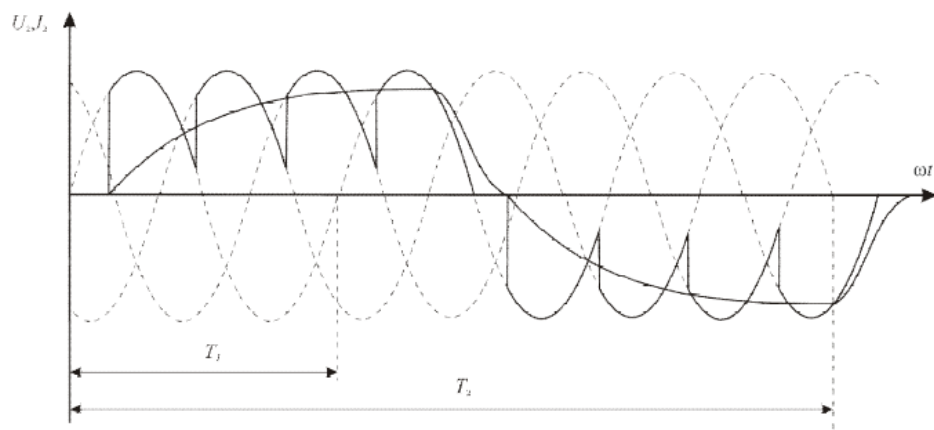


Рисунок 2.6 – Діаграми струмів перетворювачів частоти

Другим видом перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком є однофазний НПЧ з примусовою комутацією, наданий на рисунку 2.7. Для включення тиристорів у цьому перетворювачі використовуються комутаційні конденсатори. При позитивній полярності напруги живлення працюють тиристори  $VS_2$ ,  $VS_3$ , при негативній  $VS_1$ ,  $VS_4$ . Напрямок, струму навантаження не залежить від полярності напруги живлення  $U_1$ . Вихідна напруга перетворювача промодельована синусоїдальною напругою з частотою мережі живлення. За рахунок того, що існує примусова комутація, ми можемо отримати частоту вихідної напруги вищою або навіть і нижчою за частоту живлячої напруги.

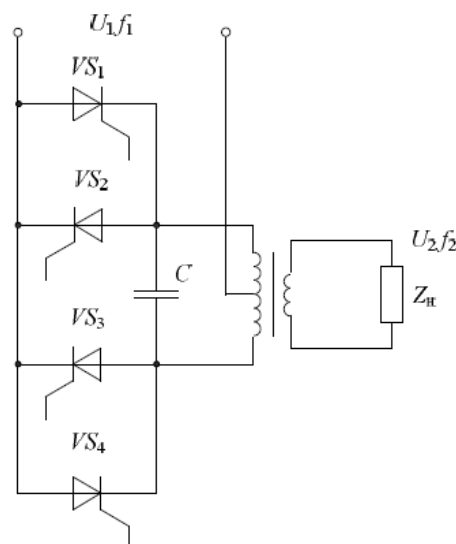


Рисунок 2.7 – Перетворювач частоти з примусовою комутацією

### Перетворювачі частоти з проміжною ланкою змінного струму

Ці перетворювачі, зображені на рисунку 2.8, мають значний плюс за рахунок використання у якості АІ резонансних інверторі, які зменшують втрати на вентилях, дроселях і конденсаторах. Однак значним недоліком перетворювача частоти з проміжною ланкою змінного струму є потрійне перетворення енергії, що веде до зменшення ККД, низької надійності і складності схеми.

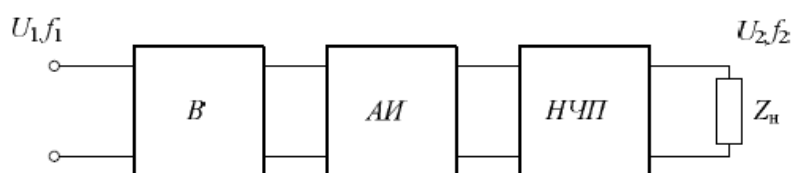


Рисунок 2.8 – Перетворювачі частоти з проміжною ланкою змінного струму

Виходячи з розглянутих вище перетворювачів частоти можна узагальнити, що перетворювачі частоти містять схему постійного струму з входнім перетворювачем на стороні мережі живлення та вихідним перетворювачем (зазвичай працює як інвертор) на стороні навантаження. У конфігурації струму або напруги постійного струму міститься фільтр, який відокремлює струм або напругу систем подачі та навантаження. З цієї причини дві основні (живлення та навантаження) частоти взаємно відокремлені. Але ідеальної фільтрації не існує, і завжди є певна ступінь зчеплення. У результаті, компоненти струму, пов'язані з навантаженням, присутні в лінії постійного струму, а їх компоненти присутні на стороні живлення. Ці компоненти є субгармонічними та інтергармонічними по відношенню до частоти енергетичної системи [13].

### Джерело струму навантаження комутаційних інверторів

Через техніку перемикання напівпровідникових пристроїв вони класифікуються як лінійні комутаційні непрямі перетворювачі частоти. Перетворювач частоти складається з двох трьохфазних мостів  $P1$  і  $P2$  та лінії постійного струму з реактором (індуктивності  $L_d$  - рисунок 2.9). Один з мостів працює в режимі випрямлення, а інший в режимі інвертора, хоча їх функції можуть бути взаємозамінними [13].

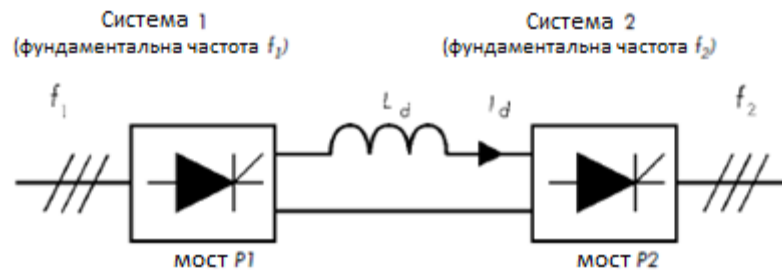


Рисунок 2.9 – Непрямий перетворювач частоти з навантаженням яке комутується інвертором

Наявність двох випрямних мостів, що отримують постачання з двох систем різної частоти, призводить до модуляції струму на лінії постійного струму на двох частотах -  $f_1$  і  $f_2$ . Кожен з перетворювачів буде нав'язувати нехарактерні компоненти на лінії постійного струму, які з'являться як неорієнтовані гармоніки на стороні змінного струму як у навантаженні, так і в системі живлення.

Компоненти на лінії постійного струму:

з системи 1:  $f_{d1} = p_1 k f_1 \quad k = 0, 1, 2, \dots$

з системи 2:  $f_{d2} = p_2 n f_2 \quad n = 0, 1, 2, \dots$

де  $p_1, p_2$  = номер імпульсу відповідно перетворювачів  $P1$  і  $P2$

$f_1$  = основна частота системи 1 (мережа живлення) [Гц]

$f_2$  = основна частота системи 2 (навантаження) [Гц].

Робота перетворювача  $P1$  призведе до виникнення характеристичних струмів гармонік у мережах з наступними частотами:

$$f_{hh,char} = (p_1 k \pm 1) f_1 \quad k = 1, 2, \dots \quad (2.6)$$

Крім того, виникнуть компоненти, пов'язані з компонентами лінії постійного струму, створені  $P2$ .

Повний комплект частот мережевих компонентів мережі живлення може бути виражений у загальному вигляді:



$$\begin{aligned} \text{частоти в мережі живлення (система 1)} &= \\ &= (kp_1 \pm 1)f_1 \pm p_2 n f_2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$  і  $n = 0, 1, 2, \dots$

Припускаючи  $n = 0$ , для  $k = 0, 1, 2, \dots$  отримаємо порядок характерних гармонік для заданої конфігурації перетворювача P1. Компоненти, визначені для  $k = \text{const}$  і  $n \neq 0$ , являють собою бічні смуги, суміжні з характеристичними частотами інвертора. Таким чином, кожна характерна гармоніка, наприклад, для шестиімпульсного мосту, порядку  $n_1 = 1, 5, 7, \dots$  має свої бічні смуги, як це показано для 5-ї гармоніки на рисунку 2.10.

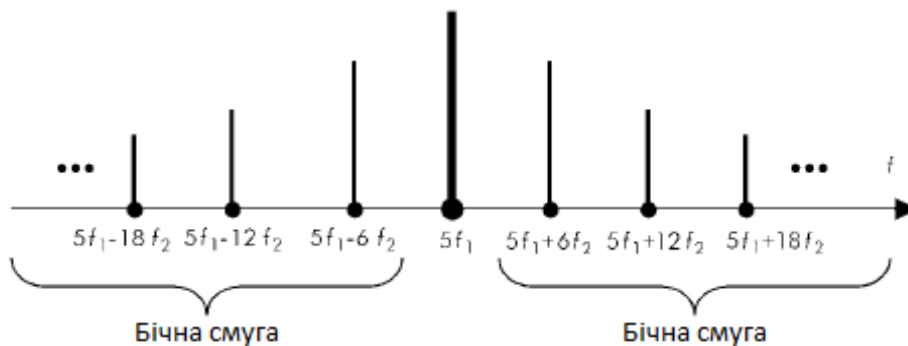


Рисунок 2.10 – Бічні смуги, що прилягають до характерної 5-ї гармоніки шести-імпульсного перетворювача P1 і P2

Найбільша амплітуда має першу пару інтергармонік, що протікає поблизу основного компонента, тобто з частотами  $f_1 \pm p_2 f_2$ . Індуктивність реактора в лінії постійного струму має значний вплив на рівень інтергармонік. Прикладом конфігурації електричного приводу, що містить інвертор струму, є статичний диск відновлення слайдів.

### Інвертори з джерелом напруги

Для перетворювачів з джерелом напруги, зображеному на рисунку 2.11, також переважають характерні гармоніки перетворювача P1. Бічні смуги, з частотами,

визначеними кількістю імпульсів перетворювача  $P2$ , відбуваються навколо характеристик частот  $P1$ , тобто:

$$(kp1 \pm 1) f1 \pm n p2 f2 \quad (2.8)$$

для  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$   $n = 0, 1, 2, \dots$  У більшості випадків неорієнтовані гармоніки є дуже невеликою частиною струму подачі [13].

Деякі перетворювачі містять активний вихідний випрямляч, який працює на частоті перемикання, який не є цілим числом лінійної частоти. Ця частота може бути постійною або змінною залежно від конструкції контролера перетворювача.

Частотні перетворювачі з джерелом напруги з модульованим входним випрямлячем широтно-імпульсної модуляції випромінюють компоненти струму на частоті комутації напівпровідникового пристрою та їх гармоніки, які не синхронізовані з частотою лінії. Зазвичай вони знаходяться в межах від декількох сотень Гц до декількох десятків кГц.

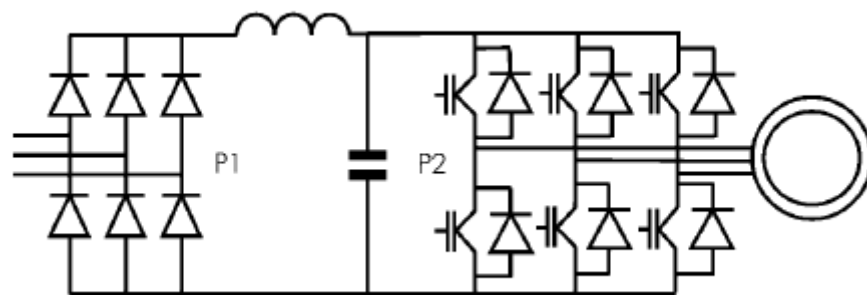


Рисунок 2.11 – Електрична схема перетворювача частоти з джерелом напруги лінії постійного струму

Наступним розглянемо процес генерації гармонік та інтергармонік у дворівневому приводі з регульованою швидкістю, де трифазний діодний випрямний пристрій підключений до інвертора, який поділяє загальний зв'язок постійного струму. Вихідні гармонічні компоненти інвертора спочатку аналізуються при використанні методу синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (*SPWM*). Потім проходить взаємодія гармонік вихідної сторони інвертора та гармонік входної

частини діодного випрямляча, що може призвести до інтергармонік на стороні входу.[23]

Двоступенева напруга джерела *AC-DC-AC* приводів з регульованою швидкістю є одним з основних джерел інтергармонік в енергосистемі. Структурна схема регульованих швидкісних приводів з відповідними гармоніками та міжгармонічними взаємодіями показана на рисунку 2.12. У цьому відношенні основна частота,  $f_{in}$  спочатку виправляється через трифазний діодний випрямляч. Тоді, на ланцюзі постійного струму, при використанні пасивних фільтрів (індуктора та конденсатора), отримується більш гладка постійна напруга, щоб подати задній кінець інвертора широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Нарешті, трифазний інвертор подає вихідні навантаження на потрібні рівні потужності та частоти. Оскільки діодний випрямляч та інвертор ШІМ перетворюють основну частоту шляхом перемикавання, вони виробляють гармоніки, пов'язані з основними частотами. Враховуючи, що в програмах приводів з регульованою швидкістю вихідна частота коливається в широкому діапазоні, частота введення системи, плавник, відрізняється від вихідної частоти  $f_{out}$ . Гармонічні компоненти з обох сторін, коли вони поширюються через ланцюг постійного струму, взаємодіють з іншими гармонічними компонентами, що, в свою чергу, породжує інтергармоніки з обох боків приводів з регульованою швидкістю.

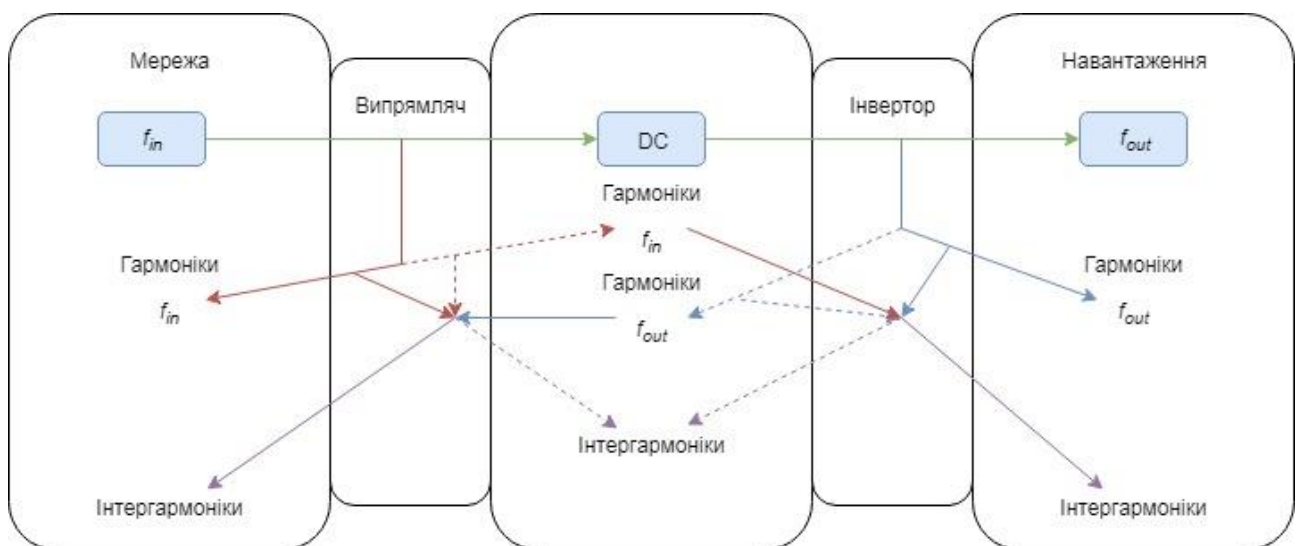


Рисунок 2.12 – Структурна схема двотактного джерела напруги приводу з регульованою швидкістю з пов'язаними гармоніками та взаємодією інтергармонік.

Гармонічні та інтергармонічні частоти в приводах з регульованою швидкістю характеризуються конфігурацією пристроїв. Структура приводів з регульованою швидкістю та пов'язана методика модуляції визначають інтергармонічні розташування. У цьому розділі проаналізовано гармонічні та міжгармонічні компоненти, пов'язані з ДВА, що подаються на двоступінчастий етап, коли реалізується природно відібрана методика модуляції *SPWM* [23].

### **Гармонічний аналіз**

#### **Трифазний діодний випрямляч**

Трифазний діодний випрямляч є найпопулярнішою структурою для виправлення трифазної напруги живлення в приводах з регульованою швидкістю. Поки регульована напруга постійного струму відповідає обмеженням при різних умовах навантаження, ця структура є належним вибором, інакше діоди повинні бути замінені комутаційними пристроями, такими як тиристори та керовані випрямлячі. На рисунку 2.13 показана типова структура шести-імпульсного діодного випрямляча. Правильний дизайн індуктора постійного струму  $L_{dc}$  та конденсатора  $C_{dc}$  призводить до більш плавної зміни струму та напруги у ланцюзі постійного струму відповідно.

Припускаючи, що випрямляч живиться безкінечною шиною, напруга постійного струму утворюється з шести форм куполоподібної форми в одному фундаментальному періоді живлення, як показано на рисунку 2.14. Враховуючи безпорядковий струм ланцюга постійного струму  $i_{rect}$ , струм  $i_a$  складається з періодичних прямокутних імпульсів з частотою основної компоненти сітки [23]. Отже, вхідний струм діодного випрямляча може бути математично представлений відомим розкладом Фур'є і це дано як нижче,

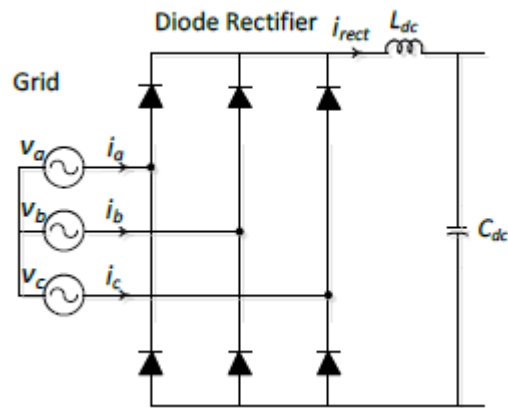


Рисунок 2.13 – Типова будова шестиімпульсного діодного випрямляча, з'єднаного з жорсткою сіткою.

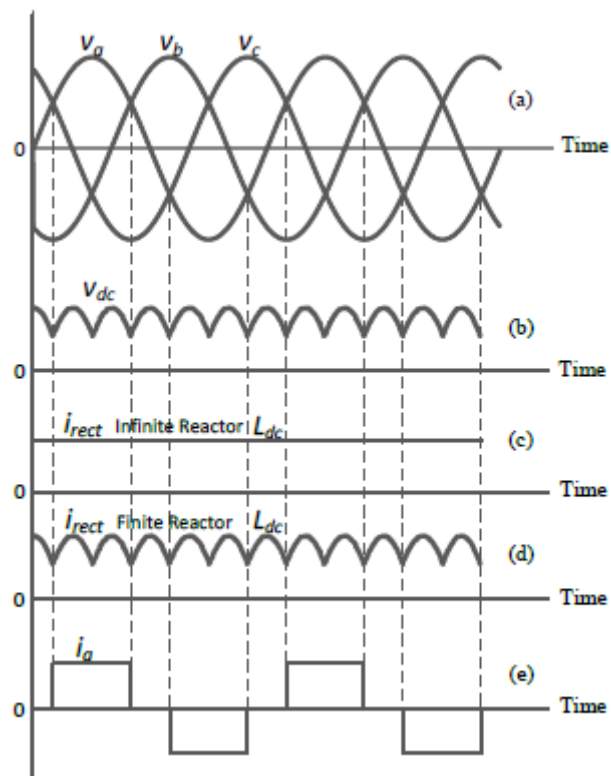


Рисунок 2.14 – Потужність діодного випрямляча та струми сигналів. (а) Трифазні вхідні напруги. (b) напруга постійного струму. (c) струм постійного струму з індуктором нескінченного розміру. (d) струм постійного струму з кінцевим розміром індуктивності. (e) вхідний струм з нескінченною розмірною індуктивністю.

$$\begin{aligned}
i_a &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{rect} [\cos 2\pi f_{in} t - \frac{1}{5} \cos 2\pi(5f_{in})t + \frac{1}{7} \cos 2\pi(7f_{in})t - \dots] \\
&= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{rect} [\cos 2\pi f_{in} t \pm \sum_{k'=1}^{\infty} \frac{1}{6k' \pm 1} \cos[(6k' \pm 1)(2\pi f_{in})t]
\end{aligned} \tag{2.9}$$

де, струм ланцюга постійного струму та основна частота позначаються як  $i_{rect}$  і  $f_{in}$  відповідно. При розрахунку (2.9)  $i_{rect}$  струму ланцюга постійного струму розглядається як постійне значення за рахунок застосування великої індуктивності постійного струму  $L_{dc}$ . У практичному стані струм ланцюга постійного струму бачить коливання з тими ж частотами, що і напруга ланцюга постійного струму. Таким чином, він містить шості кратні множини основної частоти, а його частотні компоненти  $f_{dc}^h$  можуть бути представлені як,

$$f_{dc}^h = 6 \cdot m \cdot f_{in} \quad m = 1, 2, 3, \dots \tag{2.10}$$

З (2.9) можна зауважити, що вхідні струми мають частотні порядки  $(6k' \pm 1)$  відносно основної частоти. Гармонічна частота  $(6k' \pm 1) f_{in}$  потім може бути модульована з шести-порядковими коливаннями струму ланцюга постійного струму  $i_{rect}$  шляхом реалізації тригонометричної ідентичності, наведеної в (2.11),

$$\sin a \cdot \sin b = \frac{1}{2} [\cos(a - b) - \cos(a + b)] \tag{2.11}$$

Підставляючи (2.10) у (2.9), і, використовуючи тригонометричне тотожність (2.11), частоти  $f_{dc}^h$  в вхідному струмі струму можуть бути описані як:

$$\begin{aligned}
f_{dc}^h &= [6 \cdot (k' + m) \pm 1] \cdot f_{in} = (6k \pm 1) \cdot f_{in} \\
k &= 1, 2, 3, \dots
\end{aligned} \tag{2.12}$$

### Інвертор з широтно-імпульсною модуляцією

Джерело напруги з інвертора що подається на привод з регульованою швидкістю, широко використовуються у промисловості від низько- та середньовисоких потужностей, де вони перетворюють до декількох значень потужності МВА. Технологія модуляції *SPWM* розглядається як один з основних методів модуляції, реалізований на інверторі приводів з регульованою швидкістю, головним чином через її просту структуру та лінійну керованість. У цьому розділі проводиться гармонійний та інтергармонічний аналіз, який базується на синхронному природному зразку *SPWM*, де несуча частота  $f_c$  являє собою множинне ціле число вихідної базової частоти  $f_{out}$  виход [20]. Слід зазначити, що реалізація несинхронної ШІМ може спричинити небажані гармоніки на виході інвертора, а отже, може призвести до невідомих вхідних струмів інтергармоніки.

На рисунку 2.15 показана загальна структура трифазного інвертора, який живить індукційну машину яка використовується як навантаження. В результаті перемикання напруга ланцюга постійного струму перетворюється на імпульсний потік, основна частота якого дорівнює бажаній вихідній частоті. На рисунку 2.16 ілюструється процес модуляції, що призводить до імпульсного потоку який виходить з інвертора. Порівнюючи сигнал потоку  $\Delta$  з сигналом модуляції  $C_{UO}$ , подається вихідний імпульсний потік  $v_{UO}$ . Вихідні напруги  $v_{VO}$  та  $v_{WO}$  також можна отримати, порівнюючи  $\Delta$  з іншими двома сигналами модуляції  $C_{VO}$  та  $C_{WO}$ , які переміщуються у фазу на  $120^\circ$  і  $240^\circ$  щодо  $C_{UO}$ . Сформовані полюсні напруги містять значення ланцюга постійного струму  $V^0$ , основний компонент  $v_{XO}^1$  та гармоніки  $\widetilde{v_{XO}}$  (в основному розташовані навколо частоти перемикання та її множини), і, отже, загалом можуть бути представлені наступним чином:

$$v_{XO} = V^0 + v_{XO}^1 + \widetilde{v_{XO}} \quad (2.13)$$

де  $X$  позначає вузли  $U$ ,  $V$  і  $W$ , показані на рисунку 2.15. Гармонічні компоненти  $\widetilde{v_{XO}}$  можна розглядати наступним чином:

$$\widetilde{v_{XO}} = \sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(2\pi n f_{out} t + n\varphi_X) \quad (2.14)$$

з  $A_n$  і  $f_{out}$ , що представляють коефіцієнт Фур'є і основну частоту вихідної напруги. Фазовий кут  $C_{XO}$  також позначений як  $\varphi_X$ . Коефіцієнт Фур'є  $A_n$  можна розрахувати як [25],

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{m_a V_{dc}}{2} \left\{ \sum_{p=1}^{\infty} [1 - (-1)^{n+p(m_f-1)}] \cdot R(n, p, m_f, m_a, \varphi_X) \right\} \\ &= \frac{m_a V_{dc}}{2} \left\{ \sum_{p=1}^{\infty} Q(\cdot) \cdot R(n, p, m_f, m_a, \varphi_X) \right\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

де індекс модуляції  $m_a$  є співвідношенням амплітуд між опорним та несуча сигналом. Співвідношення імпульсів  $m_f$  визначається співвідношенням між носієм і основною частотою і,

$$\begin{aligned} R(\cdot) &= \frac{J_{pm_f+n}(p\varepsilon) \cdot e^{tpm_f\varphi_X} - J_{pm_f-n}(p\varepsilon) \cdot e^{-tpm_f\varphi_X}}{p\varepsilon} \\ \varepsilon &= \frac{(m_a\pi)}{2} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Коефіцієнти в (2.15) містять  $J_y(z)$ , що представляє функції Бесселя першого роду порядку  $y$  і аргументу  $z$ . Підставляючи (2.15) в (2.14), а після деяких маніпуляцій вихідні гармонічні компоненти  $\widetilde{v_{XO}}$  інвертора можуть бути отримані як,

$$\begin{aligned} \widetilde{v_{XO}} &= \frac{V_{dc}}{\pi} \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq \{0, \pm 1\}}}^{+\infty} \sum_{p=1}^{+\infty} \{Q(\cdot) J_{pm_f+n} \left( \frac{pm_a\pi}{2} \right) \frac{1}{p} \sin[2\pi n f_{out} t + \\ &\quad + (pm_f + n)\varphi_X]\} \end{aligned} \quad (2.17)$$



Що стосується (2.13), то варто зазначити, що якщо співвідношення імпульсів  $m_f$  вибрано як непарне ціле число, то  $v_{xo}$  містить тільки непарні гармоніки, а компонент постійного струму  $V^0$  точно дорівнює  $\frac{V_{dc}}{2}$ . Проте, вибравши рівне ціле значення для  $m_f$ , виникає як непарні, так і парні гармоніки для  $v_{xo}$ . Крім того, компонент ланцюга постійного струму  $V^0$  може відрізнятись від  $\frac{V_{dc}}{2}$ .

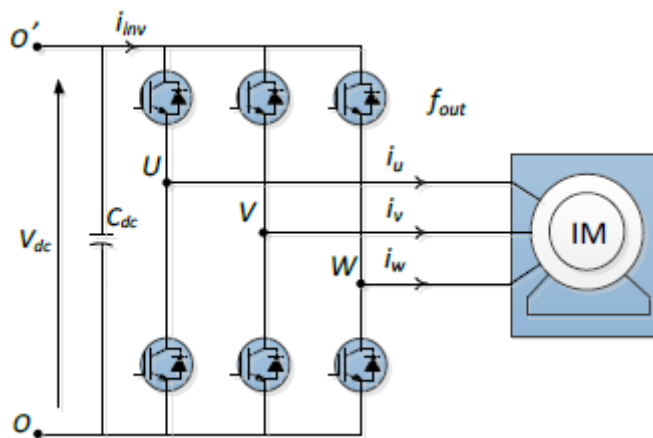


Рисунок 2.15 – Інвертор з ШІМ, що подає на трифазний індуктивний двигун (ІД).

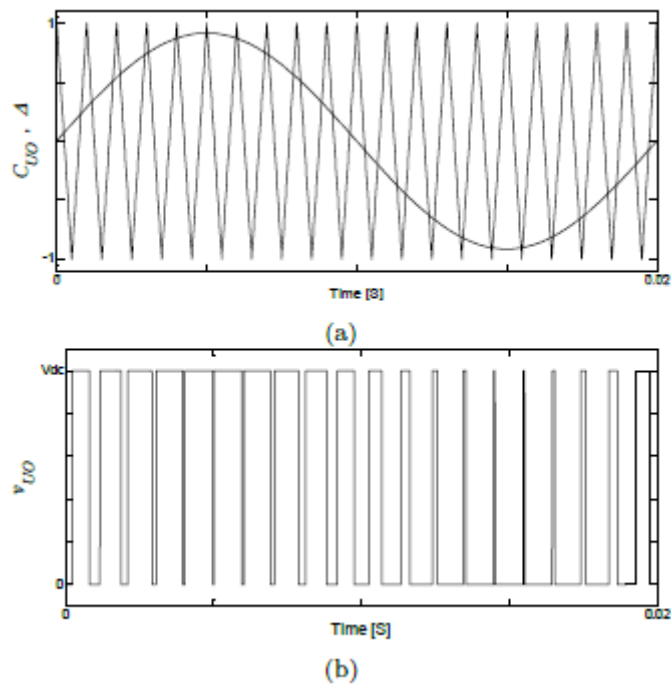


Рисунок 2.16 – Синхронний синусоїдальний ШІМ: (а) Синусоїдальний сигнал модуляції для фази  $U \in CUO$ , а, є сигнал несучої, (б)  $v_{UO}$  - це імпульсний потік вихідної напруги

Що стосується співвідношення  $m_f$ , то можна досліджувати гармонічні компоненти  $\widetilde{v_{XO}}$  в (2.17). Термін  $Q(\cdot)$  в (2.17) може бути 0 або 2. Якщо  $m_f$  вибрано як непарне значення, то  $Q(\cdot)$  може бути переписано наступним чином:

$$Q(\cdot) = 1 - (-1)^{n+p(m_f-1)} = 1 - (-1)^n \quad (2.18)$$

З (2.18) видно, що значення  $Q(\cdot)$  залежить тільки від  $n$  параметра. Розглядаючи непарне ціле значення для  $n$ , його можна представити як  $(-p \cdot m_f + k)$ , і,  $\widetilde{v_{XO}}$  в (2.9) можна переставити як

$$\widetilde{v_{XO}} = \frac{2V_{dc}}{\pi} \sum_{p=1}^{+\infty} \frac{1}{p} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \{J_k\left(\frac{pm_a\pi}{2}\right) \sin[2\pi(-p \cdot m_f + k)f_{out}t + k\varphi_X]\} \quad (2.19)$$

де  $p + k = \text{непарні}$

Однак, якщо  $m_f$  обрано рівним,  $Q(\cdot)$  залежить як від  $n$ , так і від  $p$ . У цьому випадку  $\widetilde{v_{XO}}$  в (2.17) може містити всі гармонічні компоненти, і, як правило,  $n$  може бути представлено як  $(p \cdot m_f + k)$ , де  $p$  і  $k$  можуть бути всі цілі значення.

Що стосується співвідношення  $m_f$ , то компоненти гармонік на стороні виходу інвертора можуть бути виражені як

$$f_{out}^h = |p \cdot m_f \pm k| f_{out} \quad (2.20)$$

з  $f_{out}$  і  $f_{out}^h$ , що позначають основну частоту та гармонічні компоненти на виході інвертора відповідно. Реалізовані набори  $p$  і  $k$  відносно значення  $m_f$  вказані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри  $p$  і  $k$  щодо рівних і непарних  $m_f$  в термінах гармонічного аналізу з використанням синхронного *SPWM*.

Непарні $m_f$		Парні $m_f$	
$p$	$k$	$p$	$k$
Парні	Непарні	Парні	Цілі числа
Непарні	Парні	Непарні	Цілі числа

### Інтергармонічний аналіз

У двоетапному приводі з регульованою швидкістю, що працює на основі інвертора з джерелом напруги, де трифазний діодний випрямляч переднього кінця з'єднується з інвертором з широтно-імпульсною модуляцією із зворотним зв'язком через фільтр постійного струму, існуючі гармоніки в сітці на стороні навантаження можуть передаватись на інший бік через ланцюг постійного струму, і, отже, можуть породжувати генерацію інтергармонік на вході приводу, на стороні ланцюга постійного струму та навантаження.

Для аналізу взаємодії гармонік в приводі з регульованою швидкістю, передбачається, що інвертор не розсіює або не генерує потужність, і навантаження також збалансоване. У цьому стані інверторний потік постійного струму  $i_{inv}$  може бути отриманий як,

$$i_{inv} = \frac{1}{V_{dc}} (v_{UO} \cdot i_u + v_{VO} \cdot i_v + v_{WO} \cdot i_w) \quad (2.21)$$

де  $v_{UO}$ ,  $v_{VO}$  та  $v_{WO}$  позначають трифазні пульсуючі напруги, пов'язані з полюсами  $UO$ ,  $VO$  та  $WO$ , відповідно. Вихідні струми приводу представлені як  $i_u$ ,  $i_v$  та  $i_w$ , і вони визначені на рисунку 2.15.

Відповідно до (2.13), гармонічні компоненти  $i_{inv}$  поточного струму інвертора ланцюга постійного струму можуть бути оцінені шляхом модулювання гармонік  $v_{UO}$ ,  $v_{VO}$  та  $v_{WO}$  з відповідними струмами  $i_u$ ,  $i_v$  та  $i_w$ . Гармонічні компоненти напруги інвертора напруги  $v_{XO}$  з  $X = U, V, W$  оцінюються як (2.12). Вибравши асинхронний двигун як навантаження і враховуючи збалансовану роботу, гармонічні компоненти вихідних струмів розміщуються на тих самих частотах, що й у відповідних напругах. Гармонічні компоненти  $f_{dc,out}^h$  з струму інвертора ланцюга постійного струму, таким чином, можуть бути виведені у вигляді [24],

$$f_{dc,out}^h = |p \cdot m_f \pm (k \pm 1)| f_{out} = |p \cdot m_f \pm r| f_{out} \quad (2.22)$$

де параметри  $p$  і  $k$  можуть бути призначені на основі табл. 2.1 та параметр  $r = k \pm 1$ . Посильна комбінація  $p$  та  $r$  відносно  $m_f$  представлена в таблиці 2.2. Гармонічні компоненти  $f_{dc,out}^h$ , струму інвертора ланцюга постійного струму з використанням методу модуляції  $SPWM$ , будуть взаємодіяти з гармоніками вхідного струму та, отже, призвести до вхідного струму інтергармонік. Варто зазначити, що гармоніки шести порядків  $f_{dc}^h$ , в ланцюзі постійного струму, створені діодним випрямлячем на передній панелі, також взаємодіють з гармонікою вихідної сторони інвертора і можуть призвести до інтергармонік на стороні навантаження. Дійсно вхідний струм інтергармоніки привода з регульованою швидкістю можна представити таким чином:

$$f_{in}^{ih} = |(6m \pm 1) \cdot f_{in} \pm (pm_f \pm r) \cdot f_{out}| \quad (2.23)$$

де  $m = 0, 1, 2, \dots, i, p$  і  $r$  можна отримати з таблиці 2.2. Згадуючи рівняння (2.10) та (2.20), вихідний струм інтергармонік також може бути представлений як,

$$f_{out}^{ih} = |6m \cdot f_{in} \pm (pm_f \pm k) \cdot f_{out}| \quad (2.24)$$

де  $m = 1, 2, \dots, i, p$  і  $k$  можна отримати з таблиці 2.1. Що стосується значення імпульсного співвідношення  $m_f$ , то варто також зазначити, що ціле число має бути прийняте, щоб мати синхронну широтно-імпульсну модуляцію. Отже, коефіцієнт модуляції взагалі може бути представлений як,

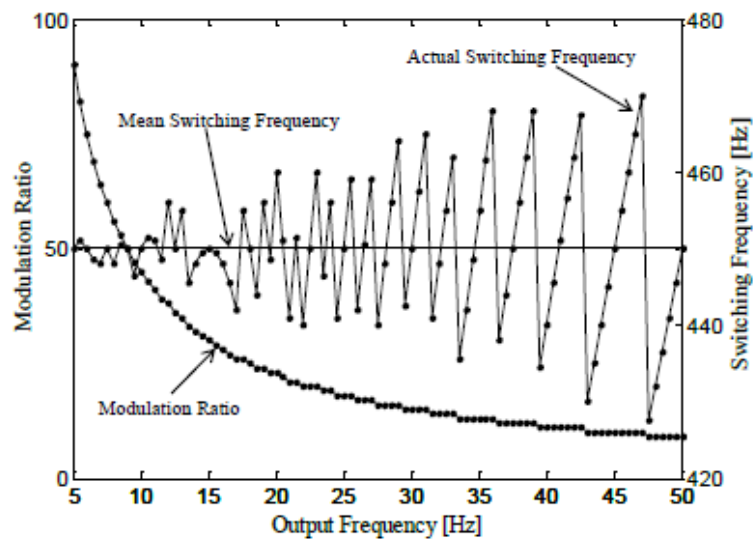
$$m_f = \text{round}\left(\frac{f_{sw}^*}{f_{out}}\right) \quad (2.25)$$

де  $f_{sw}^*$  позначає асинхронну частоту перемикавання, а функція  $\text{round}(\cdot)$  дає ціле число, найближче до аргументу. Рисунок 2.17 ілюструє зміни співвідношення модуляції в приводі з регульованою швидкістю, коли прийнята постійна величина 450 Гц для середньої частоти перемикавання інвертора  $f_{sw}^*$  на різних вихідних частотах  $f_{out}$ . Фактична частота перемикавання інвертора  $f_{sw}$  також побудована на цьому малюнку. Видно, що коефіцієнт модуляції змінюється, коли привод з регульованою швидкістю працює на різних вихідних частотах.

Таблиця 2.2 – Параметри  $p$  і  $r$  щодо рівних і непарних  $m_f$  в термінах гармонічного аналізу з використанням синхронного *SPWM*.

Непарні $m_f$		Парні $m_f$	
$p$	$r$	$p$	$r$
Парні	Непарні	Парні	Цілі числа
Непарні	Парні	Непарні	Цілі числа

Динамічні інтергармонічні частоти на вході приводу щодо вихідної частоти, отримані за допомогою (2.23), представлені на рисунку 2.18. Необхідне співвідношення імпульсу  $m_f$  розглядається на Рисунку 2.17. Частоти перемикавання джерела та інвертора зафіксовані відповідно на 50 Гц та 450 Гц. Для чіткості наведені лише ті інтергармонічні компоненти, що утворюються в результаті взаємодії деяких гармонік вихідної сторони інвертора з базовою частотною компонентою сітчастих елементів. З рисунка 2.18 видно, що при деяких діапазонах вихідної частоти може відбуватися перекриття інтергармонічних компонентів на стороні входу. У цих умовах складно окремо звернути увагу на виникнення



інтергармонік.

Рисунок 2.17 – Коефіцієнт модуляції інвертора  $m_f$  та частота перемикавання  $f_{sw}$  при впровадженні синхронного *SPWM*.

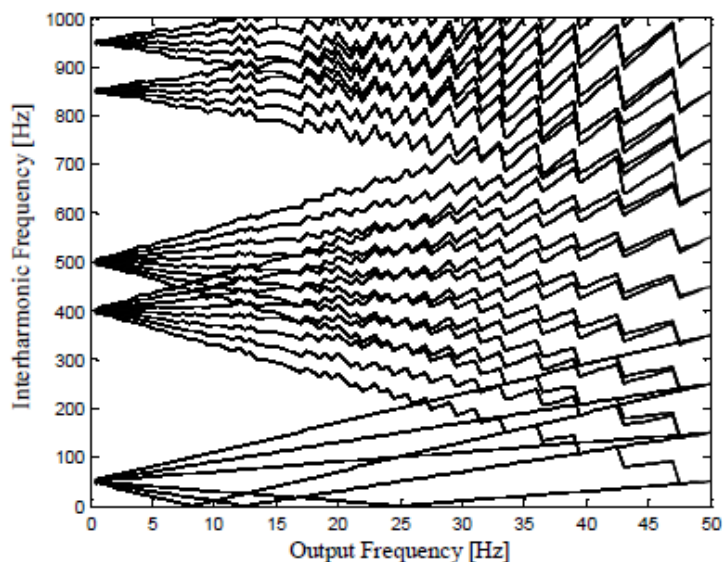


Рисунок 2.18 – Частота інтергармонічного струму на вході приводу, отримана за допомогою рівняння (2.23), з  $m = 1$ , співвідношенням модуляції  $m_f$ , як показано на малюнку 2.6, і  $(p, r) = \{(0,2), (0,4), (0,6), (1,1), (1,3), (1,5), (1,7), (2,0), (2,2), (2,4)\}$ .

Вищезгаданий теоретичний аналіз щодо інтергармонічних частот вхідного струму приводу з регульованою швидкістю був виконаний, коли при роботі інвертора розглядається природно відібрана методика модуляції *SPWM*. Інтергармонічні розташування, зображені на рисунку 2.18, забезпечать гарне розуміння процесів генерації інтергармонічного апарату приводу з регульованою швидкістю, коли двигун працює на різних швидкостях.

## 2.2 Основні методи визначення інтергармонік

Джерелами інтергармонік є споживачі, які працюють постійно або тимчасово в перехідному режимі [16]. Цей режим обумовлений або зміною навантаження, пов'язаного з режимом технологічних процесів, або особливостями електромагнітних процесів, що супроводжують роботу електроприладів, наприклад напівдуплексна робота перетворювача частоти на випрямлення. У першому випадку процеси зміни струму (напруги) характеризуються випадковістю або неперіодичністю. У другому випадку, якщо ефектами випадкових втручань

нехтують, процеси зміни струму (напруги) джерел інтергармонік можна розглядати як періодичні. Цей підхід можна застосувати як до аналізу, так і для обчислення інтергармонік, сформованих різними джерелами.

Інтергармоніки виникають внаслідок модуляції основної частоти і гармонік іншими частотними компонентами і спостерігається під час експлуатації статичних перетворювачів частоти, зокрема циклоконверторами, асинхронними двигунами (ІЧ), асинхронними перетворювальними каскадами, дуговими печами, зварювальними машинами тощо. Через це дослідження їх виникнення, поширення і агрегації важливе для забезпечення якості та надійності від джерела живлення.

Аналіз гармонік та інтергармонік завжди викликав серйозну стурбованість при проблемах якості енергії, контролем, а також захистом енергосистеми. В даний час існує цілий ряд алгоритмів аналізу форми хвилі струму і напруги. Оцінка їх ефективності включає в себе визначення точності і швидкодії. Припускаючи стаціонарну умову для гармонік, яка, як правило, має місце у порівнянні з іншими порушеннями якості енергії, гармонійний аналіз може виконуватися в частотній області шляхом впровадження дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) та його розвиненої моделі, що називається швидке перетворення Фур'є (ШПФ), в основі якого лежить уявлення про те, що будь-яку періодичну функцію можна представити у вигляді суми окремих гармонійних складових (синусоїд н косинусоїд з різними амплітудами, частотами) - розкладання в ряд Фур'є.

З досвіду вимірювання та аналізу показано, що при наявності інтергармонічних компонентів у сітці пряма реалізація ШПФ може призвести до неточного аналізу частот та проблеми спектральної витоку. Такі неточності також можуть статися, коли основна частота мережі також свідчить про деякі відхилення від номінального значення, головним чином через невідповідність потужності між джерелом та навантаженням. Після вищезгаданих труднощів в останні роки було запущено багато досліджень для оцінки параметрів гармонічних та інтергармонічних компонентів енергосистем з прийнятним рівнем точності, класифікація яких зображена на рисунку 2.19 [23].



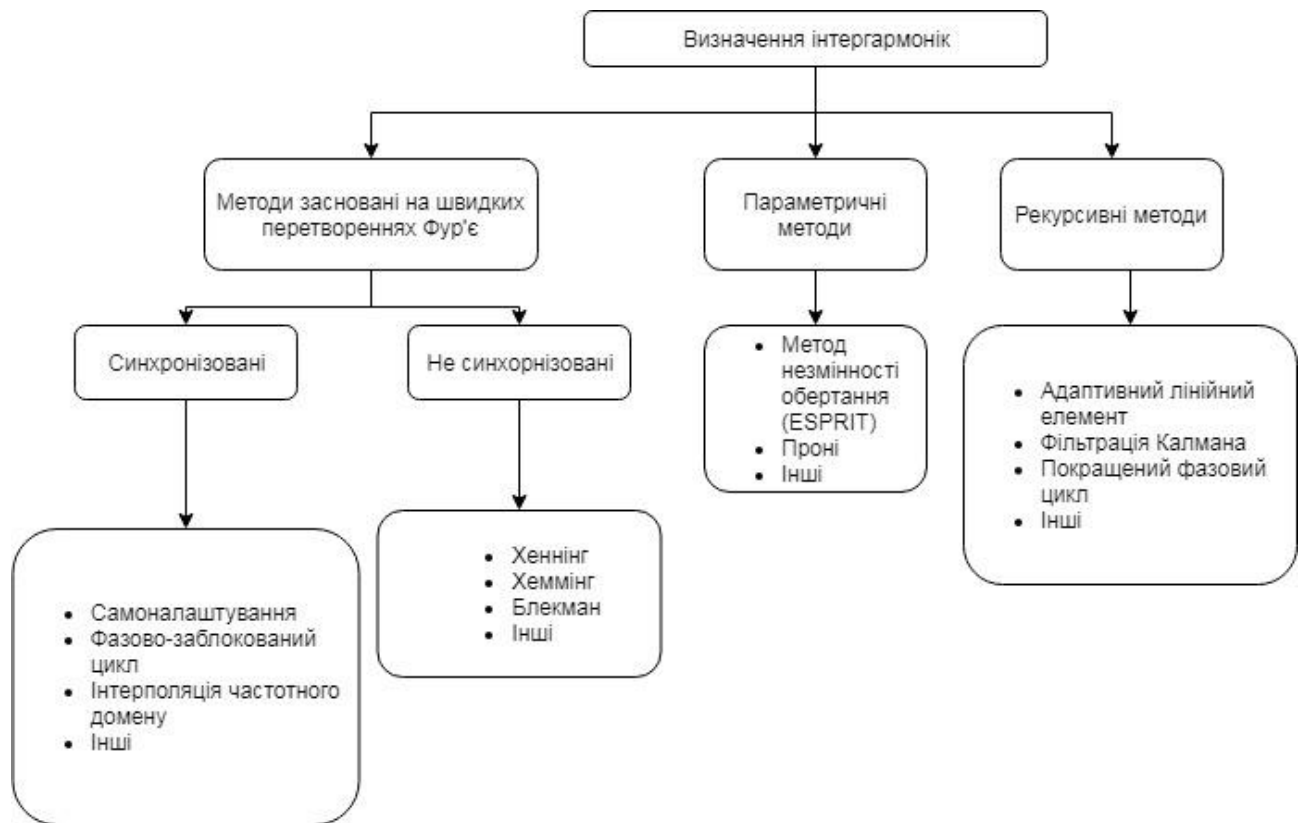


Рисунок 2.19 – Класифікація методів визначення інтергармонік

Варіація частоти енергосистеми істотно впливає на точність ШПФ, коли використовується фіксована частота дискретизації. Більш того, ефект пікетування, який може виникнути через прийняття недостатніх основних частотних циклів, може призвести до неточної оцінки за наявності інтергармонічних елементів. Мінімальний відмінний інтервал у частотному спектрі, який називається частотним дозвіллом  $f_0$ , також може бути визначений як,

$$f_0 = \frac{1}{T_\omega} = \frac{f_s}{N} \quad (2.26)$$

де  $N$  позначає кількість балів, відібраних на частоті дискретизації  $f_s$ , і  $T_\omega$  - тривалість вікна спостереження. Стандарт 61000-4-7 Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) запропонував метод стандартизації гармонійних та інтергармонічних вимірювань. Відповідно до цього методу, для використання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) рекомендується прямокутне часове вікно, яке дорівнює десяти циклам для систем із частотою 50 Гц або дванадцяти циклам для систем 60

Гц, що відповідає в обох випадках приблизно 200 мс. У зв'язку з цим частотна роздільна здатність фіксується на 5 Гц, і інтергармоніки, розміщені між комірками, розташованими на відстані 5 Гц, можуть проливатись над суміжні інтергармонічні комірки [20].

Метод на базі ШПФ фактично можна розділити на дві частини; з синхронізованим та несинхронізованим підходів до аналізу. У підході синхронізації основна частота енергосистеми оцінюється спочатку за допомогою реалізації методів синхронізації з механізмами повторної вибірки, такими як вікно самоналаштування, фазово-заблокований цикл, інтерполяція частотного домену, а потім буде виконано ШПФ, що спричинить частотний спектр доменів з меншими перешкодами. У деяких випадках, замість застосування синхронізації з механізмом повторної вибірки, де частота дискретизації синхронізується з основною частотою, дані, що відбираються, будуть знову побудовані з новою частотою дискретизації за допомогою деяких методів інтерполяції, таких як метод Ньютона, поліноми тощо. [23].

Для зменшення похибки оцінки та проблем спектральної витоку в несинхронізованому підході можна застосовувати декілька технологій віконної обробки, таких як Хеннінг, Хеммінг, Блекман. Для подальшого зменшення надходження гармонік на інтергармонічні компоненти в даному підході для фільтрації гармонік може застосовуватися дворівнева техніка.

Для зменшення часу проведення ДПФ був розроблений алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). В даний час алгоритм ШПФ зайняв майже монопольне становище не тільки серед алгоритмів спектрального оцінювання, а й в інших областях обробки інформації. Однак алгоритми Фур'є мають кілька джерел методичних похибок, які призводять до низької точності результатів гармонійного аналізу і до якісного їх спотворення. Головними недоліками є обмеженість частотного дозволу і точності оцінки частоти окремих гармонійних компонент. Перше передбачає роздільну здатність поділу двох спектральних складових з близькими частотами, а друге - правильність визначення частоти відокремленої гармонійної компоненти. Для підвищення точності проведення ШПФ

застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіювання (в разі коли довжина тимчасової вибірки не дорівнює періоду аналізованої функції) проводиться синхронізація частоти дискретизації з частотою досліджуваного сигналу, доповнення нулями вихідної вибірки аналізованого сигналу або застосування тимчасових або спектральних вікон. Ефективним засобом зменшення ефекту спектральних витоків також є застосування віконних функцій з інтерполяційним алгоритмом [5].

**Визначення ІГ з графіка стохастичних процесів.** Для визначення амплітуд і частот інтергармонік, можна застосувати перетворення Фур'є безпосередньо до графіки стохастичних процесів, що описують фактичні об'ємні струми  $I(t)$  та обсяги  $U(t)$ . Цей розклад робиться для реалізації на конкретному проміжку. Гармонійний аналіз можна легко провести за допомогою швидких перетворень Фур'є (ШПФ). Енергія інтергармонік відповідно до графів  $I(t)$  приймається як сума реальних значень квадратів  $A^2$ . Значення енергії визначаються площею обмеженою кривою  $I(t)$  і чисельно дорівнює до дисперсії процесу. Щоб отримати спектральний склад періодичних компонентів, можна застосувати ШПФ до «хвоста» кореляції функція (КФ); таким чином, поступаючись спектру квадратів інтеграмонік ( $A^2$ ).

Дискретний спектр дозволяє оцінити співвідношення між енергією інтергармонік та загальною вартістю енергії процесу  $I(t)$ . Дослідження довели, що частка ІГ дискретного спектру енергії в електричних мережах з електротехнічних одиниць складає 10-25% від загальної енергії процесу змішаного спектра.

**Визначення ІГ на основі інтеграла Фур'є.** Аналітичні дослідження неперіодичних процесів у багатьох випадках виконане на основі прямого перетворення Фур'є (або інтегралів Фур'є); при розкладанні в ряд Фур'є так зване обернене перетворення Фур'є, неможливо.

У спектральній теорії стохастичних процесів відносини між процесами у часі та частоті домену  $\xi(t)$  приймає форму

$$S(\omega) = \int \sum_{-\infty}^{\infty} (t) e^{-j\omega t} dt, \quad (2.27)$$

де  $S(\omega)$  - спектральна щільність процесу або комплексу спектр неперіодичного процесу  $\xi(t)$ . Модуль  $|S(\omega)|$  іноді називають *спектром* для простоти. Процес  $\xi(t)$  може бути представлений як сума нескінченно великої кількості нескінченно малих коливань, нескінченно подібні у частоті, що відображає так званий безперервний спектр. Спектр квадрату процесу  $\Sigma^2$  являє собою технологічну енергію  $W_T$ , випромінювану протягом часу  $T$

$$W_T = \int_0^T \Sigma^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |S(\omega)|^2 d\omega \quad (2.28)$$

Середня потужність

$$\frac{W_T}{2} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |S(\omega)|^2 d\omega = G(\omega) \quad (2.29)$$

де  $G(\omega)$  - енергетичний спектр, тобто потужність на одиницю частоти або спектральна щільність потужності.

Формула (2.28) означає так звану теорему Релея.

Спектральні щільності  $S(\omega)$  і  $G(\omega)$  і коефіцієнт кореляції (КК) є основними елементами спектральної кореляції теорії стохастичних процесів.

Стохастичні процеси в електротехнічних одиницях є вузькою смугою для їх прогресу

$$G(\omega) = \frac{D}{2\pi} \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega_1 - \omega)^2} \quad (2.30)$$

де  $D$  - процес дисперсії;  $\omega_1$  і  $\alpha$  – коефіцієнт затухання і коефіцієнт кореляції власної частота.

Енергетичний спектр  $G(\omega)$  складається з безперервної  $G_N$  і дискретні компоненти  $G_D$

$$G = G_N + G_D \quad (2.31)$$

За компонентом  $G_N$  характеризується розподіл безперервного спектру інтергармонік. Формула для струму  $I(\omega)$  виводиться на підставі формули Релея враховуючи співвідношення

$$I(\omega) = \frac{2}{T} G(\omega) \quad (2.32)$$

Значення  $G(\omega)$  практично можна знайти з рівняння енергетичного спектра та кореляційної функції (КФ), тоді як значення КФ можна встановити або за допомогою вимірювань або аналізу.

Запропонована методика обчислення амплітуди спектру ІГ дозволяє розширювати метод обчислення струмів і напруг ВГ у вузлах промислових підключень до розрахунку ІГ за допомогою методу вузла напруги. Якщо є джерела декількох ІГ підключених до основних вузлів, стохастичний процес зміни струму цього вузлового нелінійного навантаження є сумою стохастичних процесів струмів навантаження від кожного окремого джерела. Кожне навантаження, яке є джерелом ІГ, можна лікувати окремо одне від одного. Тоді спектральна вузлова токова щільність з мережі з декількома джерелами ІГ є сумою спектральних щільностей струму відповідних нелінійних навантажень. Щоб визначити спектр напруг ІГ, ми встановили систему вузлових рівнянь, яка має наступну матричну форму

$$Y_y(\omega)U(\omega) = I(\omega) \quad (2.33)$$

де  $Y_y(\omega)$  - матриця провідності вузла мережі;  $U(\omega)$  - матриця модулів спектра напруги в мережевих вузлах;  $I(\omega)$  - матриця модулів спектрів струму ІГ в мережевих вузлах (матриця модулів магістральних струмів ІГ).

Матричне рівняння вузла (3) вирішується через матрицю спектрів вузових напруг

$$U(\omega) = Z_y(\omega)I(\omega) \quad (2.34)$$

де  $Z_y(\omega)$  - матриця опору вузла мережі

$$Z_y(\omega) = Y_y(\omega) \quad (2.35)$$

Оціночні методи, як правило, базуються на аналогії, репродукції фізичних процесів, на знанні особливостей взаємного впливу певних видів електроустаткування або прецедентів. Як правило, ці методи поєднуються зі спрощеними підходами: отже, група різних видів електротехнічного обладнання (мотори, генератори, трансформатори, тощо) розглядається як єдине фізичне тіло з параметрами які насправді є сумою різних параметрів одиниць обладнання. Зміни в кількості того чи іншого виду обладнання відображається як відповідна зміна в споживанні електроенергії. Консолідовані індекси використовуються для відомих видів обладнання [2].

Зазвичай перетворення Фур'є використовують для отримання частотного спектру неперіодичної функції електричного сигналу для подання його у вигляді суми гармонічних коливань. Для досягнення цього застосовується властивість згортки.

Прикладом цього може бути поданий у вигляді сигналу  $f(t)$  відгук системи:

$$g(t) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (2.36)$$

де  $\alpha(\tau)$  – це певна функція.

Через такий запис можливо визначити, що відгук системи залежить як і від моментального значення збурення, так і від збурення системи, яке змінило її стан у минулому.

Застосовуючи перетворення Фур'є отримуємо:

$$\begin{aligned} G(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \int_0^{\infty} \alpha(\tau) f(t - \tau) d\tau dt = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \int_0^{\infty} \alpha(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega') e^{i\omega'(t-\tau)} d\omega' d\tau dt \end{aligned} \quad (2.37)$$

Оскільки

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega' - \omega)t} dt = 2\pi \delta(\omega' - \omega) \quad (2.38)$$

де  $\delta(x)$  – дельта-функція Дірака, інтегрування дає  $G(\omega) = A(\omega)F(\omega)$ ,

де  $A(\omega) = \int_0^{\infty} \alpha(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau$

Одним з головних висновків з цього перетворення є отримання вихідного спектру лише за допомогою функції відклику системи  $A(\omega)$ .

За допомогою рядів Фур'є є можливість розкласти будь-яку періодичну функцію з періодом повторення  $T$  за умови Діріхле, як нескінченну суму гармонічних складових. Умовою Діріхле є те, що функція повинна бути обмеженою, кусочно-неперервною та мати протягом періоду скінченне число екстремумів. І через те що, нелінійна трапецієподібна форма сигналу змінного струму мостового

випрямляча повторюється з періодом часу  $T$  і частотою  $f$  ( $\omega/2\pi$ ) =  $1/T$ , тобто основною частотою, і зазвичай позначається індексом 1. На додаток до домінуючого компонента на основній частоті, форми сигналу містять компоненти на небажаних частотах, які є гармоніками (множинами) основної частоти. Там компоненти розраховуються за допомогою аналізу Фур'є.

Існує два види розкладання функції у ряди Фур'є: тригонометрична форма і комплексна форма. Тригонометрична форма ряду Фур'є має вигляд:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)], \quad (2.39)$$

де  $\omega_0 = 2\pi/T$  – циклічна частота повторення сигналу, тобто частотою основної (першої) гармоніки;

$\frac{a_0}{2}$  – постійна складова функції  $x(t)$ ;

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.40)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.41)$$

Якщо спростити цю функцію, то її можна записати у вигляді:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [A_k \cos(k\omega_0 t - \varphi_k)] \quad (2.42)$$

де  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$  – амплітуди гармонійних складових (гармоніки);

$k$  – номер гармоніки



$A_k \cos(k\omega_0 t - \varphi_k)$  –  $k$ -та гармонічна складова;

$\varphi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$  – початкові фази гармонійних складових.

Сукупність амплітуд  $A_k$  гармонійних складових утворює амплітудну спектральну характеристику (амплітудний спектр) функції  $f(t)$ , а сукупність початкових фаз  $\varphi_k$  – фазову спектральну характеристику функції  $f(t)$ . Таким чином, для будь-якої періодичної функції спектральні характеристики будуть дискретними.

Дискретна форма перетворень Фур'є буде визначатись як:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (2.43)$$

де  $x$  – це сигнал у дискретній часовій області;  $n$  – індекс виборки за часовою областю;  $N$  – загальна кількість виборок у інтервалі спостережень;  $X_k$  –  $k$ -та гармоніка;  $k$  – гармонічний індекс.

За допомогою цього рівняння спектри  $k$ -ої гармоніки переводяться у початок координат (0 Гц), а потім фільтрують за допомогою фільтра низьких частот, довжину  $N$  або прямокутне вікно вимірювання можна обчислити через швидкі дискретні перетворення Фур'є:

$$X_k[m] = X_k[m-1] - x_{n-N} \cdot e^{-j \frac{2\pi k(n-N)}{N}} + x_n \cdot e^{-j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (2.44)$$

де  $x$  – сигнал у дискретній часовій області,  $n$  представляє собою зразок  $x$  у дискретній часовій області;  $N$  – довжина прямокутного скользящего вікна;  $X_k$  –  $k$ -та гармоніка;  $k$  – гармонічний індекс, а  $m$  – індекс виборки у частотній області.

Через обмеженість спектрального аналізу на основі дискретних перетворень Фур'є існує можливість що деякі сигнали випадково можуть бути інтерпретовані як ті, що налічують інтергармоніки. Розглянемо два основних випадки.

Перший випадок пов'язан з нестационарним сигналом. Система живлення має багато варіацій, таких як зміна навантаження, що може призвести до нестационарних коливань. Однак інтергармоніки як і гармоніки можливо визначити лише на основі стаціонарних сигналів, тобто форма хвилі, яка аналізується, повинна періодично повторюватись. Якщо дискретні перетворення Фур'є застосувати до нестационарних сигналів то ця умова порушується, через це не буде можливості визначити чи кожна спектральна складова, створена дискретними перетвореннями Фур'є, дійсно існує.

Другий випадок - це інтегральне управління циклом, яку використовується у печах чи іншому термічному обладнанні. Інтегральне управління циклом працює перериваючи напругу до нуля збільшенням деяких інтегральних циклів у періоді.

Виходячи з цього у аналізі інтергармонік необхідно вирішити два питання: підтвердити чи існують компоненти дрібного порядку, які були розраховані з дискретного перетворення Фур'є; визначити з задовільною точністю частоти інтергармонік. Труднощі у цих проблемах пов'язані з втратами і ефектом пікетування. Вирішення цих питань складається у виборі ширини вікна для вимірювання кратне усім сигналам періоду, тобто синхронізації. Але через те що частоти інтергармонік зазвичай є непередбачуваними тому синхронізація з інтергармоніками є практично неможливою.

Однак для більш зручного використання запишемо ряд Фур'є у комплексній формі:

$$x(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k \exp\{jK\omega_0 t\} \quad (2.45)$$

де  $A_k = A_k \exp\{-j\varphi_k\}$  – комплексна амплітуда гармонічної складової частоти  $\omega_k = K\omega_0$ .

Через тимчасову функцію  $x(t)$  можливо визначити комплексну амплітуду:

$$A_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x(t) \exp\{-jK\omega_0 t\} dt \quad (2.46)$$

Сукупність амплітуд і відповідних частот гармонік, як і початкових фаз і відповідних частот гармонік відповідно називають спектром амплітуд і спектром фаз зображеним на рисунку 2.20.

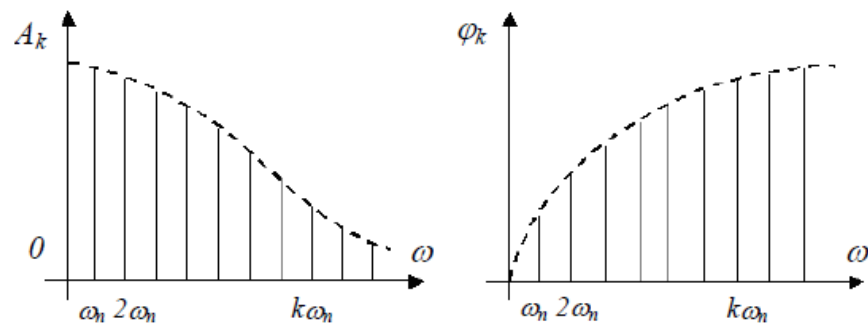


Рисунок 2.20 – Графічні зображення спектра амплітуд і спектра фаз періодичного сигналу

Окремі спектральні складові у графічному зображенні спектра амплітуд називають спектральними лініями.

Відмінностями неперіодичного сигналу від періодичного, оскільки його можна розглядати як періодичний з нескінченною тривалістю періоду зміни, буде у тому, що цей сигнал є суцільним і представляється у сумі нескінченної кількості гармонічних складових із нескінченно малими складовими, і додатково до задоволення умови Діріхле функція повинна бути абсолютно інтегрована

Однак перетворення Фур'є згідно з [25] має ряд недоліків:

- для однієї заданої частоти вимагається знання сигналу як в минулому, так і в майбутньому, що є навіть теоретично неможливим;

- відновлення сигналу після прямих і зворотних перетворень в умовах обмеження числа гармонік або спектра коливань є неможливим;
- базисною функцією при розкладанні в ряд Фур'є є гармонічне (синусоїдальне) коливання, яке математично визначено в інтервалі часу від  $-\infty$  до  $+\infty$  і має незмінні в часі параметри;
- чисельне інтегрування в часовій області від  $-\infty$  до  $+\infty$  у прямому перетворенні Фур'є і в частотній області від 0 до  $+\infty$  у зворотному перетворенні Фур'є викликає великі обчислювальні труднощі;
- деякі особливості сигналу, такі як піки або розриви, викликають невеликі зміни частотного образу сигналу на інтервалі частот від  $-\infty$  до  $+\infty$ , які розповсюджуються по всій частотній осі, через що виявлення їх за спектром практично стає неможливим;
- збільшення числа гармонік, які впливають на форму сигналу є єдиним засобом для представлення швидких змін сигналів, таких як піки або перепади;
- недоступність оцінки місця розташування особливостей на часовій залежності сигналу і їх характер за складом вищих складових спектра;
- труднощі для прямого і зворотного перетворення Фур'є для нестационарних сигналів, якими є осцилограми електроенергетичних сигналів.

### Параметричні методи

У несинхронізованих умовах параметричні методи можуть бути застосовані для забезпечення частотного спектру вибіркового сигналу з високочастотним дозволом, який зображено на рисунку 2.21. Оцінка параметрів сигналів за допомогою методів незмінності обертання (*ESPRIT*) та методу на основі Проні є одними з найбільш часто використовуваних параметричних підходів. У цих методах порядок оцінки та перешкоди від шуму мають значний вплив на результати вимірювань. Кількість обчислювань також може збільшуватися, коли потрібна висока точність.

Параметричний метод *ESPRIT* застосовується до всієї послідовності даних, і він використовує синусоїдальні моделі для оцінки частот та амплітуд сигналів

вибірки. Проблема оцінки параметрів сигналу в нестационарних даних розглядається з використанням подовжувального вікна, яке дуже схоже на короткочасне перетворення Фур'є (*STFT*), яке вже успішно застосовується протягом багатьох років [19].

У методі Проні обраний сигнал апроксимується лінійною комбінацією складних кон'югованих експонент (поліноми), і він не характеризується фіксованим частотним дозволом. Невизначені множники коефіцієнтів для ідентифікації частотних компонентів можуть бути отримані з різними підходами, такими як автокореляція, коваріація, авторегресія та методи розкладання сингулярного значення. У разі наявності сигналу, що змінюється, для оцінки параметра може застосовуватися адаптивний метод Проні.

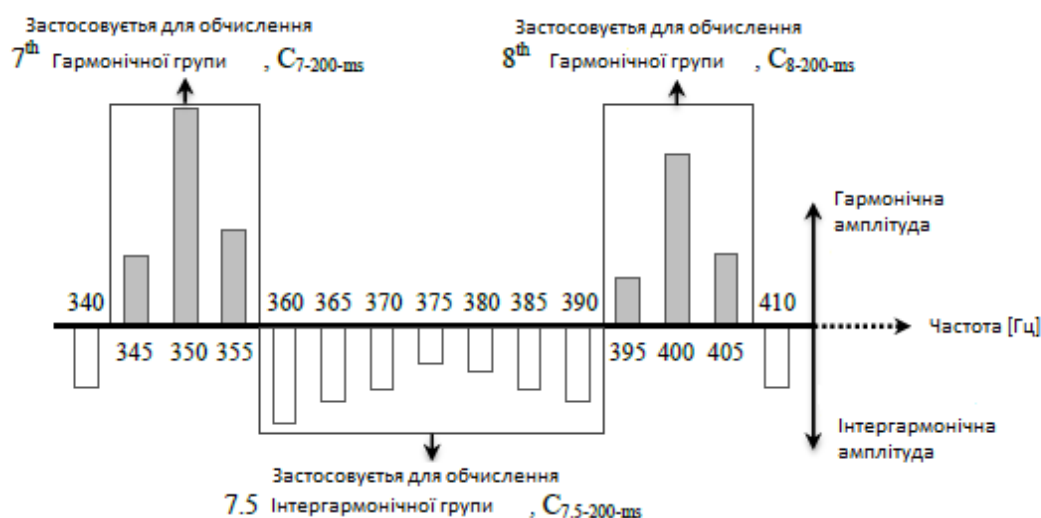


Рисунок 2.21 – Гармоніки і інтергармоніки згруповані за IEC 61 000-4-30

### Рекурсивні методи

Рекурсивний метод, як правило, є параметричним методом, який передбачає більше знань про спектр аналізованого сигналу. Для того, щоб оцінити параметри сигналу, слід обрати правильну модель. Фільтрація Калмана, адаптивний лінійний елемент (*ADALINE*) та покращений фазовий цикл (*EPLL*) розглядаються як найпоширеніші методи рекурсії.

Фільтрація Калмана - це метод оцінки стану на основі оптимального оцінювача з мінімальною коваріацією помилок. Він вводить набір динамічних

рівнянь стану та набір рівнянь спостережень для даних. Для того, щоб точно оцінити параметри, необхідно добре знати про динамічний процес та модель вимірювання. Метод *ADALINE* забезпечує адаптивний фільтр для шумопоглинання та вилучення сигналу. Враховуючи великий порядок оцінювання в даному методі, він сприяє важким обчислювальним навантаженням. Метод *EPLL*, здатний оцінити частоту, амплітуду та фазовий кут сигналу, насправді працює як смуговий фільтр. Таким чином, для гармонійної та інтергармонійної оцінки через *EPLL*, потрібно скласти декілька серій і паралельних з'єднань[19].

Як правило, рекурсивні методи переважно підходять для гармонійної оцінки, а не для інтергармонік, оскільки місця інтергармонік не надаються заздалегідь, і тому вони не розглядаються в моделі сигналу. Для впровадження цих методів для оцінки інтергармонік необхідно розширити основи розкладання, що може спричинити численну нестабільність та проблеми конвергенції.

## 2.3 Розробка способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень

### 2.3.1 Дерево рішень, як один із методів аналізу інформаційних даних

Дерево рішень - це спосіб представлення правил у ієрархічній структурі, де кожному об'єкту ставиться у відповідність єдиний вузол, який дає рішення.

Задачі, які розв'язуються за допомогою дерева рішень можуть бути об'єднані в основні три класи:

- опис даних - інформація зберігається у компактній формі дерева рішень, яке утримує точний опис об'єктів;
- класифікація - віднесення об'єктів до одного із раніше визначених класів, при цьому цільова змінна повинна мати дискретні значення;
- регресія - встановлення залежності цільової змінної, яка має неперервне значення, від вхідних змінних за допомогою дерева рішень.

Із великої кількості алгоритмів, які реалізують дерева рішень, найбільш поширеними є наступні два:

- *CART (Classification and Regression Tree)* - це алгоритм побудови бінарного дерева рішень - дихотомічної класифікаційної моделі. Кожний вузол дерева при розбитті має тільки двох нащадків (листіків). За допомогою даного алгоритму вирішуються задачі класифікації та регресії;

*C 4.5* - алгоритм побудови дерева рішень кількість нащадків у вузлі якого при цьому необмежена. Використовується тільки для вирішення задач класифікації.

### 2.3.2 Бінарне дерево ортогональних вейвлет-перетворень

Як відомо, у результаті проведення кратно-масштабного аналізу (КМА) за алгоритмом Малла послідовна двухполосна фільтрація вхідного сигналу проводиться тільки для низькочастотної області, виходячи із припущення, що дана область містить основну частину інформації. В результаті отримується «однобоке» дерево рішень, що для багатьох випадків обробки інформації є припустимим. Але дослідження свідчать, що використання результатів КМА за алгоритмом Малла не забезпечують вирішення питань їх ефективної обробки для випадків наявності у інформаційних сигналах шумових компонент [26].

У зв'язку з цим, надалі розглядається питання застосування пакетних вейвлетів для операцій послідовного частотного перетворення як низькочастотних, так і високочастотних коефіцієнтів з метою одержання збалансованого дерева вейвлет-перетворення – бінарного дерево.

Р. Койфманом, Ф. Майєром та М. Вікерхаузером були введені вейвлет-пакети, як зв'язок між КМА та вейвлетами. Простір  $V_j$  кратномасштабної апроксимації розкладається на суму просторів більш низької роздільності  $V_{j+1}$  і простору  $W_{j+1}$ . Це відбувається розбиттям ортогонального базису  $\{\varphi_j(t - 2^j n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$  простору  $V_j$  на два нових ортогональних базиси

$$\{\varphi_{j+1}(t-2^{j+1}n)\}_{n \in \mathbb{Z}} \text{ простору } V_{j+1}, \{\psi_{j+1}(t-2^{j+1}n)\}_{n \in \mathbb{Z}} \text{ простору } W_{j+1}. \quad (2.47)$$

Дані розкладання  $\varphi_{j+1}$  та  $\psi_{j+1}$  за базисом  $\{\varphi_j(t-2^j n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$  визначаються парою сполучених (низько – і високочастотних) дзеркальних фільтрів  $h[n]$  та  $g[n] = (-1)^{1-n} h[1-n]$ . Замість того, щоб розбивати апроксимаційні простори  $V_j$  для побудови просторів подробиць (деталізації)  $W_j$  і вейвлет-базису, вважаємо  $V_j = W_j$  і розбиваємо ці деталізуючі простори, для отримання нових базисів. Рекурсивне розщеплення векторних просторів представляється у вигляді двійкового дерева (рис. 2.22, а) сигналу у вигляді ГЕН (рис. 2.22, б). Сигнали апроксимуються із масштабом  $2^L$ .

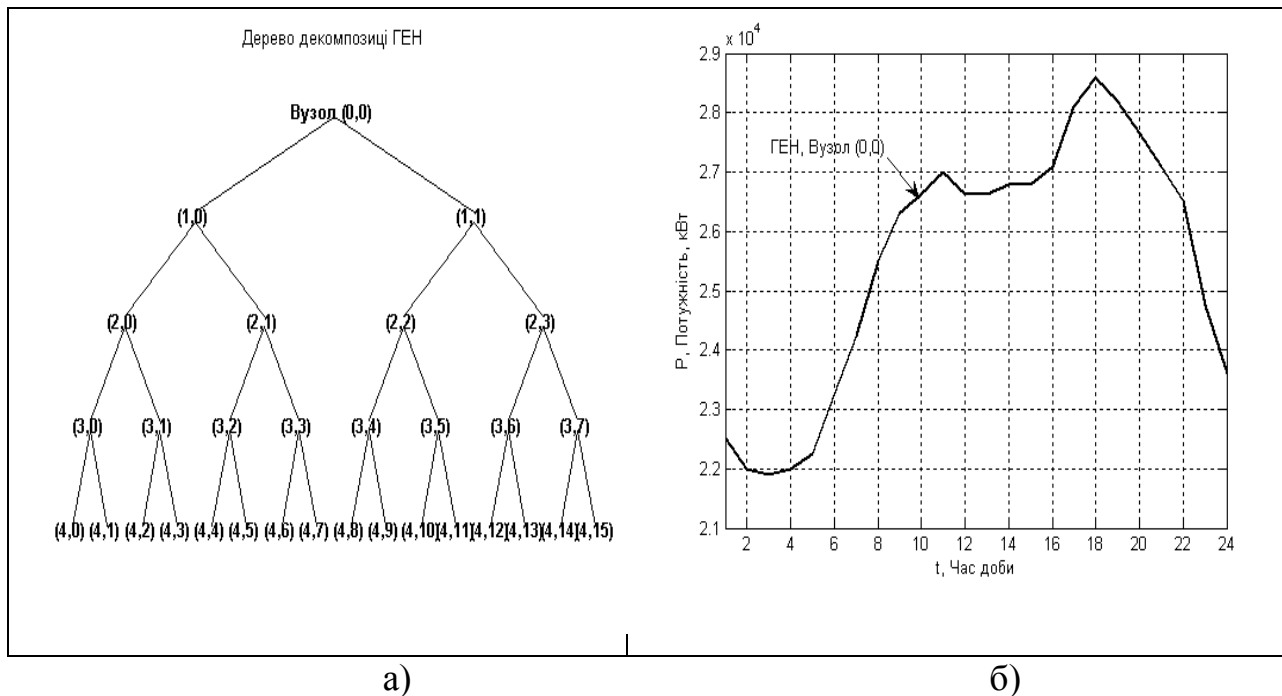


Рисунок 2.22 – Двійкове дерево простору вейвлет-пакетів а) та ГЕН б)

На рис. 2.22 представлено неповне двійкове дерево декомпозиції ГЕН (для наочного представлення нехтуємо п'ятим рівнем вейвлет-декомпозиції). Будь-який



вузол двійкового дерева позначається індексами  $(j, k)$ , де  $j$  – глибина вузла на дереві (номер рівня розкладання), і  $k$  – число вузлів, які знаходяться зліва на тій же глибині  $j - L$ . З кожним вузлом  $(j, k)$  пов'язаний простір  $W_j^k$ , який допускає ортонормований базис  $\{\psi_j^k(t - 2^j n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$  при русі вниз по дереву. Як було відмічено раніше, з коренем дерева пов'язані простори апроксимації  $V_L$ . Тобто,  $W_L^0 = V_L$ .

При застосуванні пакетних вейвлетів вхідний сигнал описується трьома параметрами: позиції та масштабу (як для звичайного вейвлет-перетворення), а також частотою. Як відомо, пакетне вейвлет-перетворення являється адаптивним. Ця адаптація не потребує навчання або відомостей про статистичні властивості сигналів і дозволяє більш точно враховувати особливості аналізованого сигналу шляхом вибору відповідної оптимальної форми дерева розкладу. Це дозволяє забезпечити мінімальну кількість вейвлет-коефіцієнтів при визначенні інтергармонічних груп.

Дослідження проводилось в плані розробки визначення та ідентифікації інтергармонічних груп. Як відомо, бінарні дерева доволі просто можуть бути представлені у вигляді списків або масивів. При цьому кожний елемент дерева має поле даних і два поля покажчиків. Один покажчик зв'язує елемент з правим нащадком, а другий – з лівим (рис. 2.23)

Дослідження показали, що представлення бінарного дерева у вигляді масиву є найбільш ефективним (рис 2.24). А саме, бінарне дерево завжди має строго означене число вершин на кожному рівні, які нумеруються зліва – направо послідовно за рівнями і використовуються в якості індексів у одномірних масивах.

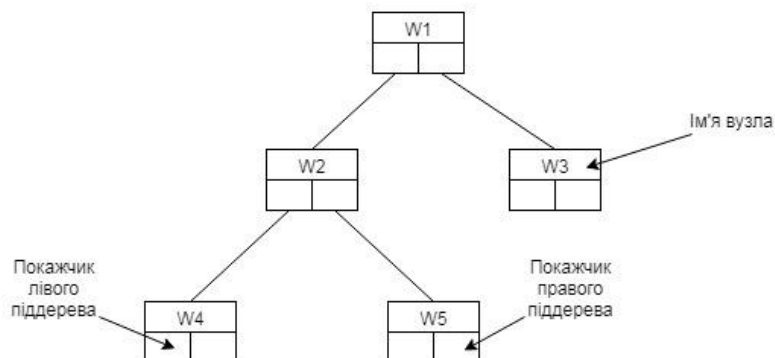


Рисунок 2.23 – Представлення бінарного дерева у вигляді спискової структури

Також, в зв'язку з тим, що в процесі обробки число рівнів дерева суттєво не змінюється, такий спосіб представлення бінарного дерева є значно більш економічним на відміну від стекової структури. При цьому, адреса будь-якої вершини в одномірному масиві обчислюється, як

$$adr = (2k - 1) + (i - 1) \quad (2.48)$$

де  $k$  - номер рівня вершини,  $i$  - номер на рівні  $k$  в повному бінарному дереві.

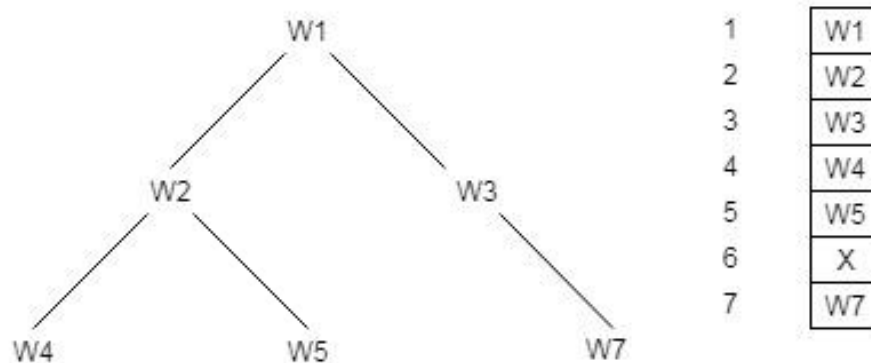


Рисунок 2.24 – Представлення бінарного дерева у вигляді масиву

Аналіз наукових досліджень свідчить, що головним недоліком даного способу представлення бінарного дерева являється те, що структура даних є статичною. Розмір масиву обирається виходячи із максимально можливої кількості рівнів бінарного дерева. Тобто чим менш повним є дерево, тим менш раціонально використовується об'єм пам'яті.

2.3.3 Побудова оптимальної структури та алгоритму формування інтергармонічних груп

За допомогою побудови оптимального дерева декомпозиції при проведенні зворотної вейвлет декомпозиції (реконструкція інформаційного сигналу) незначні, інформаційно-надлишкові, або зовсім непотрібні деталі сигналів виключаються. Мірою оптимальності при цьому являється кількість апроксимуючих і деталізуючих коефіцієнтів для реконструкції сигналу у межах заданої похибки.

При побудові дерева рішень особливу увагу слід приділяти питанням вибору критерію атрибута та відсікання віток. Обраний атрибут повинен розбивати множину так, щоб отримані в підсумку підмножини складались із об'єктів, які належать до одного класу, або є максимально наближеними до нього.

В якості функції вартості інформативності набору вейвлет-коефіцієнтів використовується ентропія Шенона. Дана функція буде великою, якщо вейвлет-коефіцієнти приблизно однієї величини, і невеликою, якщо всі вейвлет-коефіцієнти, окрім декількох, близькі до нуля. Під ентропією розуміється величина

$$E = \exp\left(-\sum_{k=1}^N P_k \log P_k\right) \quad (2.49)$$

де  $P_k = |x_k|^2 / \sum_{k=1}^N |x_k|^2$ ,  $x$  – вхідний сигнал, вейвлет-коефіцієнти якого  $\{x_k\}_{1 \leq k \leq N}$  зустрічаються з ймовірністю  $\{P_k\}_{1 \leq k \leq N}$ .

Побудову оптимального дерева рішень проведено шляхом визначення ентропії вузлів і його апроксимуючих і деталізуючих коефіцієнтів нащадків. Якщо ентропія вузла є більшою за ентропію нащадків, подальша декомпозиція в даному вузлі закінчується і дерево “обрізається”. Алгоритм декомпозиції рекурсивно продовжується до досягнення глибини декомпозиції. На рис. 2.25 та рис. 2.26 представлено повне бінарне дерево інформаційного сигналу і оптимальне дерево його декомпозиції відповідно.

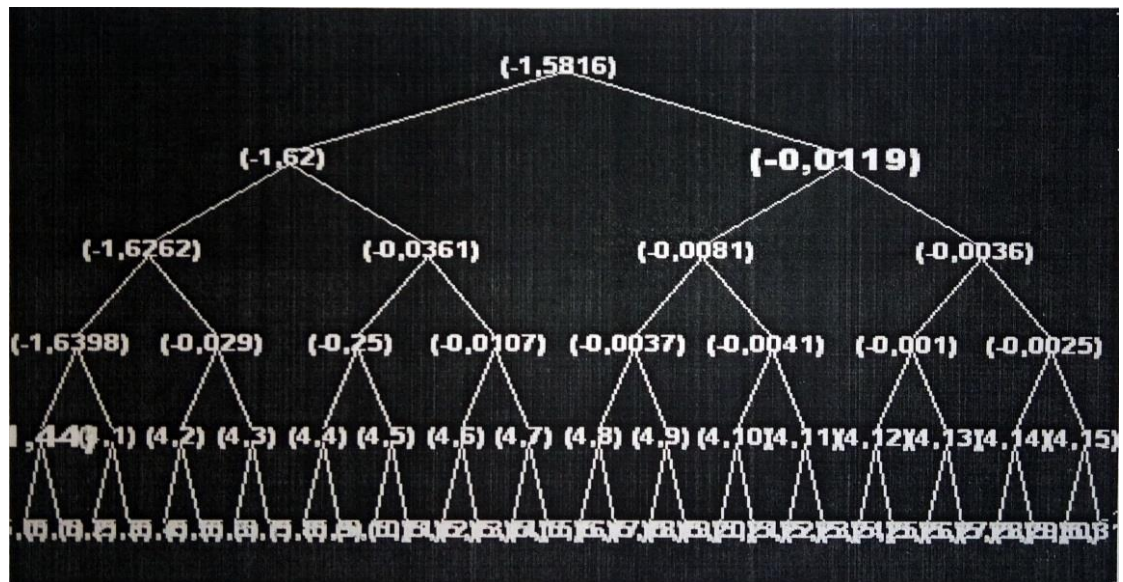


Рисунок 2.25 – Повне бінарне дерево пакетного вейвлет-перетворення

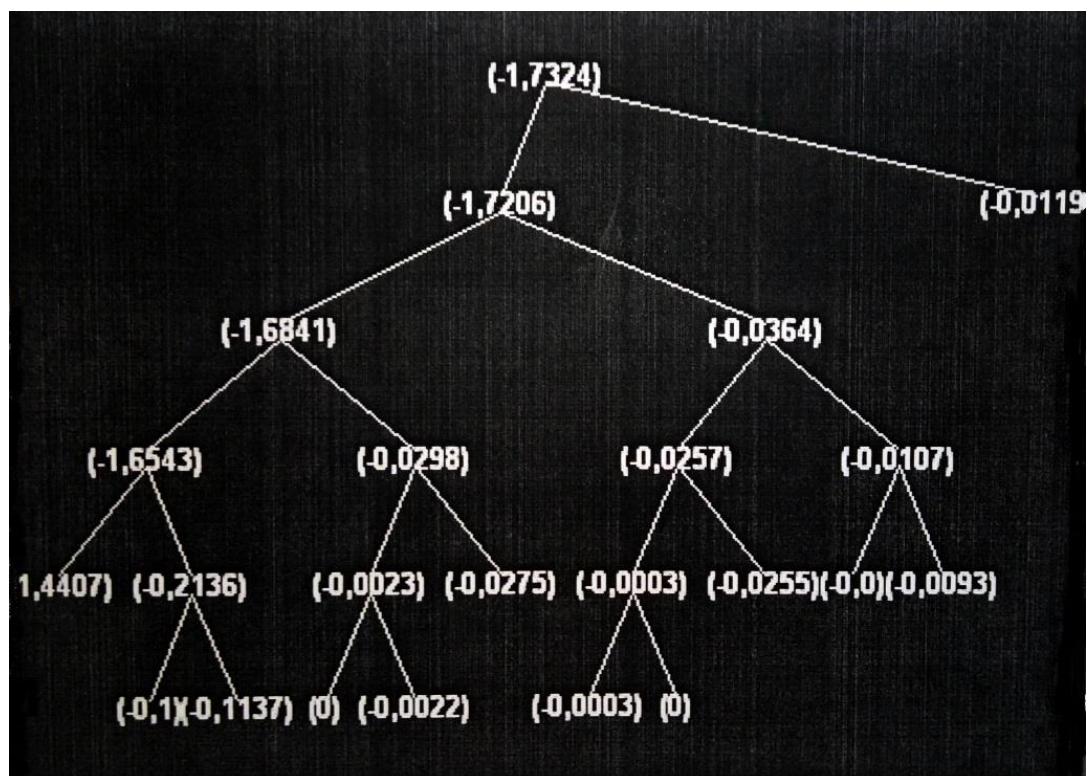


Рисунок 2.26 – Оптимальне дерево вейвлет-декомпозиції (у вузлах представлені значення ентропії)

Порогові значення  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – адаптуються до технологічного процесу характеру виробництва на стадії попередньої статистичної обробки реальних інформаційних сигналів. Проведений порівняльний аналіз даного методу з відомими показав наявність похибки 1-го роду у межах  $\sim 8\%$ , та 2-го роду у межах  $\sim 7,5\%$ .

Економія пам'яті для зберігання значень інтергармонічних підгруп знаходиться у межах 3,5%, швидкість класифікації та пошуку типових підгруп у базі даних збільшуються в 1,6 рази.

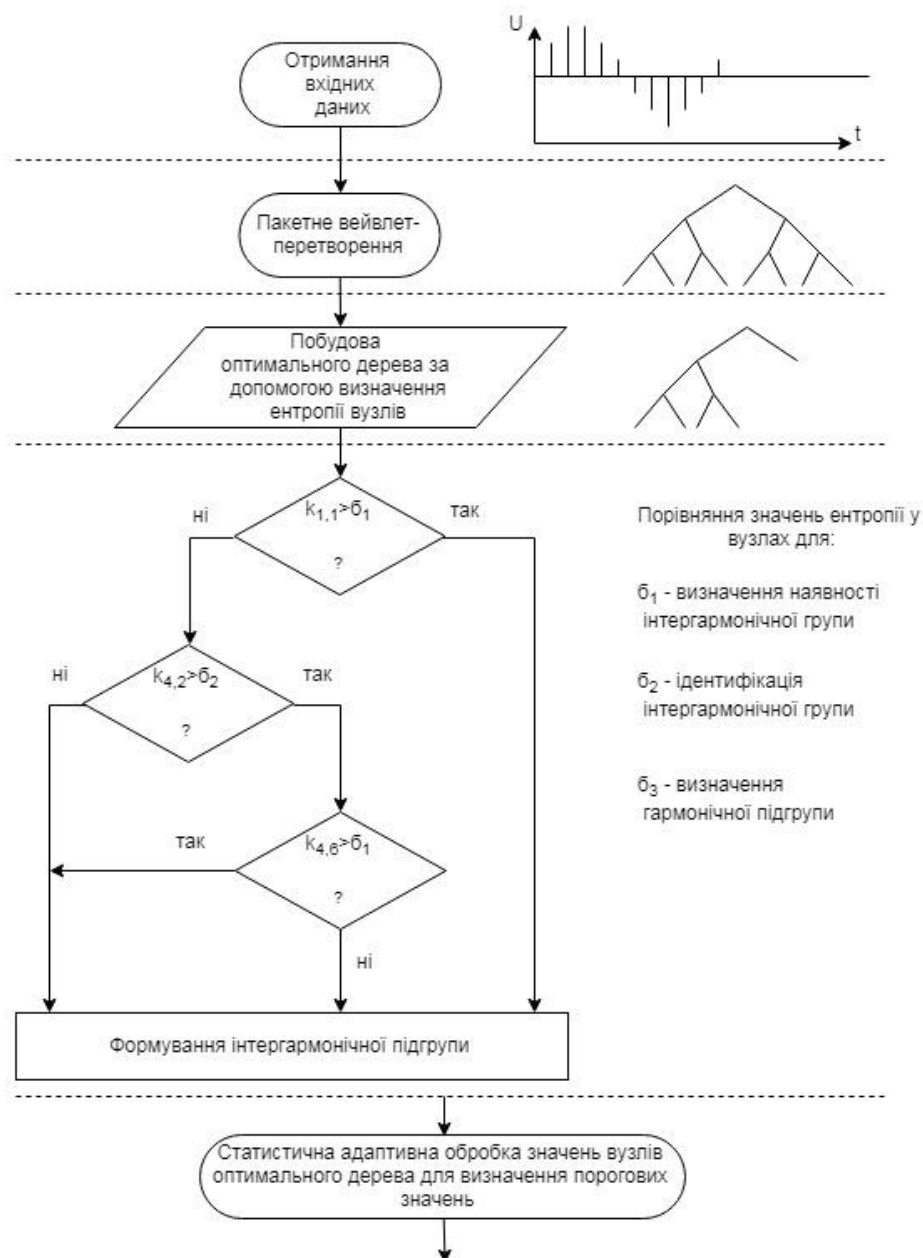


Рисунок 2.27 – Алгоритм формування інтергармонічних груп

## Висновки до розділу

1. Інтергармоніки – маловизначена частина питання якості електричної енергії та електромагнітної сумісності. Їх поява призводить до наявності асиметрії напруги, яка дуже сильно впливає на ефективність роботи електрообладнання. Так відносно

електродвигунів необхідна постійна перевірка несиметрії, щоб двигун не вийшов з ладу (вібрація, пульсація обертового моменту, перегрів однієї або декількох фазових обмоток, зменшення коефіцієнту корисної дії). Було проаналізовано основні джерела виникнення інтергармонік, серед яких перш за все випрямлячі напруги та перетворювачі частоти, також зазначено алгоритм виникнення інтергармонік. За результатами огляду основних методів визначення інтергармонік, серед яких праметричні, рекурсивні та методи засновані на перетвореннях Фур'є було визначено застарілість а також недоліки існуючих методів. Виходячи з цього у наступному розділі пропонують шляхи вирішення цих проблем з використанням новітніх методів.

2. Також існує ще два з найбільш поширених ефектів у випадку наявності інтергармонік – це поява флікера та перешкоди у лінії електропередач.

Так мерехтіння зумовлено змінами у середньоквадратичному значенні напруги. Мерехтіння змінюється із частотною та величиною цих варіантів напруги. Залежність варіантів середньоквадратичної напруги на частоті 50 Гц досягає 0,2%

3. Процес дискретизації у випадку визначення інтерграмонік (гармонік) повинен бути синхронізованим із основною частотою. В іншому випадку прийнятного результату не може бути досягнуто. А так як частота в системах електропостачання коливається (процес не стаціонарний) то використання алгоритмів Фур'є та застосування часових вікон не є прийнятними. Тому в IEC 61000-4-7 та методиці флуктуацію гармонічних компонент пропонується формувати за допомогою інтергармонічної підгрупи.

$$c_{(n+0,5)sg}^2 = \sum_{i=2}^{+\infty} c_{n\alpha_0}^w + \frac{i}{T} \quad (2.50)$$

### З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО СПОСОБУ ТА АЛГОРИТМУ СУБ- ТА ІНТЕРГАРМОНІК В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ БІНАРНОГО ДЕРЕВА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕНЬ

Для перевірки розробленого способу вимірювання (визначення) форми електричної напруги в роботі розглядалися 3 приклади:

1. Наявність в сигналі основної частоти та гармоніки;
2. Наявність в сигналі основної частоти та інтергармоніки;
3. Наявність в сигналі основної частоти, її девіації та інтергармонік

Результати експериментальних досліджень проводились у порівнянні з ДПФ.

Приклад 1. Форма сигналу у випадку наявності гармонік та інтергармонік.

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^8 A_n \sin(\omega_n + \alpha_n) + A_m \sin(\omega_m + \alpha_m) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} u = & \sin(2\pi * f_0 t) + 0.3 \sin(2 * \pi * 104 t) + 0.4 \sin(2\pi * 117 t) \\ & + 0.2 \sin(2\pi * 134 t) \\ & + 0.2 \sin(2 * \pi * 147 * t) + \dots + 0.5 \sin(2\pi * 250 t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

На рис. 3.1 представлений аналізуємий сигнал із визначенням даних в табл. 3.1

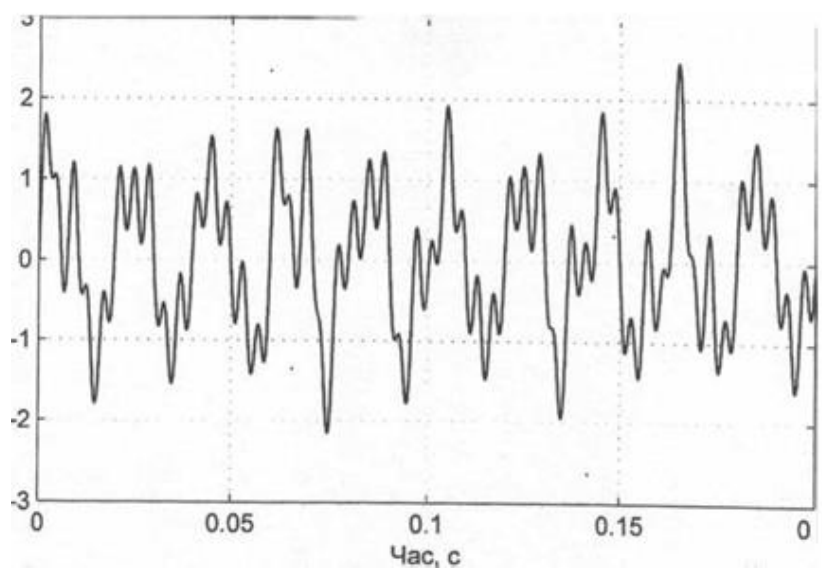


Рисунок 3.1 – Аналізуємий сигнал

Результати досліджень зведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Результати досліджень

Сигнали, Гц	Дійсне значення	ДПФ	Запропонований спосіб
50	1	1	1
100	-	-	-
150	-	-	-
200	-	-	-
250	0.5	0.5	0.5
300	-	-	-
350	-	-	-
400	-	-	-
Субгармоніки	0.2	0.18	0.195
117	0.4	0.37	0.4
134	0.2	0.21	0.201



Приклад 2. Наявність інтергармонік, які призвели до виникнення флікеру

$$u(t) = 1.5 * (1 + 0.3 * \sin(30\pi * t) * (\exp(-3t))) * \sin\left(2\pi * 50t + \frac{\pi}{6}\right) + \sin(2\pi * 117t) + \sin(2\pi * 134t) \quad (3.3)$$

На рис. 3.2 – 3.4 представлений аналізований сигнал із визначенням даних в табл. 3.2

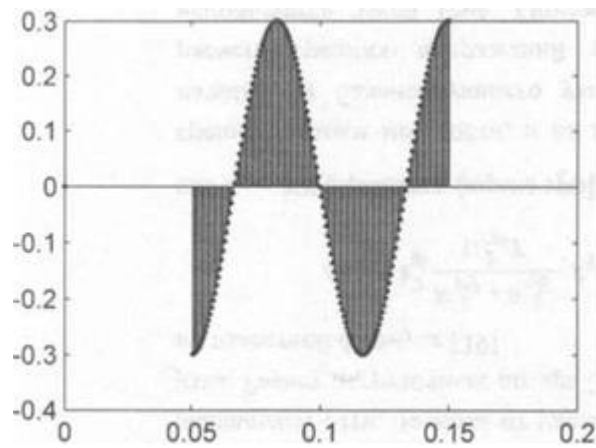


Рисунок 3.2 – Аналізований сигнал

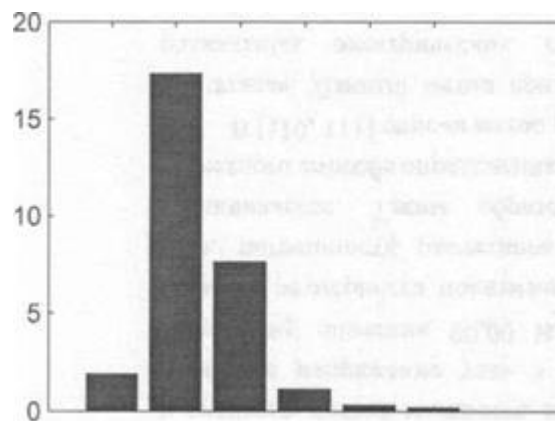


Рисунок 3.3 – Результати ортогонального вейвлет-перетворення

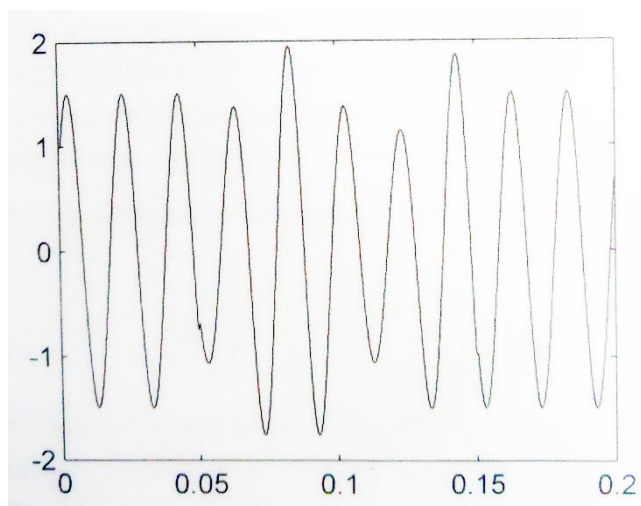


Рисунок 3.4 – Аналізований сигнал

Результати досліджень зведено в табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Результати досліджень

Сигнали, Гц	Дійсне значення	ДПФ	Запропонований спосіб
50	1	1	1
100	-	-	-
150	-	-	-
200	-	-	-
250	-	-	-
300	-	-	-
350	-	-	-
400	-	-	-
Субгармоніки	-	-	-
117	1	0.9	0.92
134	1	0.87	0.87

Приклад 3. Зашумлений сигнал за наявності основної частоти, інтергармоніки та гармонік

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 1.41 * (220 * \sin(2\omega t * 0.34) + 20 \sin(2\omega t) + 35 \\
 & * \sin(75t) + 55 * \sin(2\pi * 150t - 0.6) \dots \\
 & + 30 \sin(2\pi * 250 * t + 1.93) + 120 \sin(2\pi * 350t \\
 & * 19) + 40 \sin(2\pi * 117 + 19)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

На рис. 3.5 – 3.6 представлений аналізований сигнал із визначенням даних в табл. 3.3

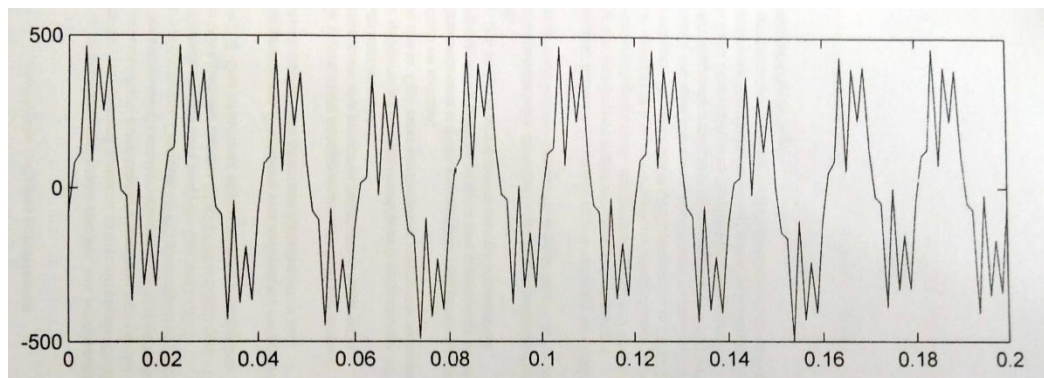


Рисунок 3.5 – Аналізований сигнал із наявністю шуму

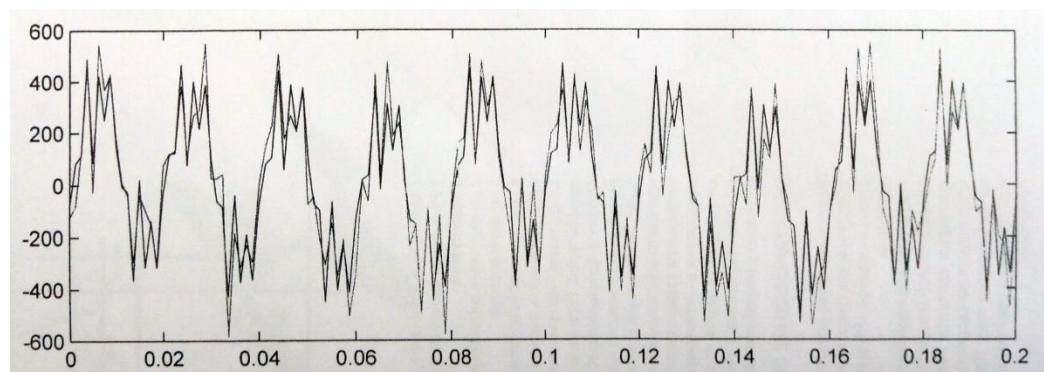


Рисунок 3.6 – Аналізований сигнал із видаленим шумом

Результати досліджень зведено в табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Результати досліджень

Сигнали, Гц	Дійсне значення	ДПФ	Запропонований спосіб
50	220	220	220
100	-	-	-
150	55	55	55
200	-	-	-
250	300	294	295
300	-	-	-
350	120	120	120
400	-	-	-
Субгармоніки	-	-	-
117	40	39.6	39.8
134	-	-	-

### Висновки до розділу

Результати проведених досліджень у вигляді порівняльного сигналу запропонованого способу визначення інтергармонічних груп та ДПФ показало наступне:

1. Наявність інтергармонік призводить до виникнення похибок у випадку застосування як методу ДПФ, так і запропонованого в роботі.
2. У випадку застосування запропонованого способу похибка визначення інтергармонік на 1-3 % менше ніж у випадку застосування ДПФ.
3. Формування інтергармонічних груп підвищує точність та достовірність визначення гармонічного складу інформаційного сигналу.

#### 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап це тимчасова фінансова структура, яка спрямована на пошук і реалізацію масштабованої бізнес-ідеї, метою якої є швидкий розвиток і отримання прибутку. Виходячи з того, що останніми роками проблеми забезпечення якості електроенергії набувають особливої актуальності у зв'язку з тим, що якість електроенергії безпосередньо впливає на економічність і тривалість експлуатації будь-яких сучасних електроприладів у різних галузях економіки, то у якості ідеї для стартапу розглядається розроблення способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень у вигляді програмного забезпечення з виявленням проблемних ділянок в електричних мережах і запропонуванням шляхів вирішення цих проблем. Маркетингові аспекти щодо створення проекту висвітлені в таблицях 4.1 - 4.14

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
1	2	3
Розроблення способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень у вигляді програмного забезпечення з виявленням проблемних ділянок в електричних мережах і запропонуванням	Визначення інтергармонік	Локалізація проблем які виникають: значні термічні ефекти; низькочастотні коливання механічної системи, миготіння світла, завади сигналів керування і захисту, перевантаження високою частотою пасивного паралельного фільтру, телекомунікаційні завади, , насичення

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
шляхів вирішення цих проблем		трансформатора струму, синхронні коливання, коливання напруги, несправності систем дистанційного управління, помилкове спрацювання тиристорної апаратури, зменшення строку служби асинхронних двигунів
	Аналіз форми хвилі струму та напруги при виході одного або групи показників за допустимі меж та тривалість такого відхилення	Залежно від величини збитків вирішують питання про доцільність застосування додаткових пристроїв для покращення ЯЕ як на рівні споживача, так і на рівні постачальника залежно від того, які саме ПЯЕ не відповідають нормі і хто є винуватцем погіршення
	Запропонування шляхів вирішення проблем пов'язаних з інтергармоніками	При ПЯ, які знаходяться в допустимих межах, має місце висока ефективність роботи електрообладнання

Відмінністю даної ідеї проекту є застосування найбільш актуальних у даний момент математичних апаратів перетворення складних сигналів за допомогою вейвлет-перетворень, які на відміну від найбільш використовуваних перетворень Фур'є зі значним недоліком – нерозрізненість інтергармонік, дозволяють оцінити достовірно і з високою точністю амплітудно-частотні та часові характеристики нестационарних сигналів.

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Розроблення способу визначення інтергармонічних підгруп на основі побудови оптимальної структури бінарного дерева вейвлет-перетворень у вигляді програмного забезпечення з виявленням проблемних ділянок в електричних мережах і запропонуванням шляхів вирішення цих проблем	Математичний апарат перетворювання складних сигналів за допомогою вейвлет-перетворень	На даний час технологія є відносно новою але потужною для аналізу та обробки сигналів	Дана технологія доступна для реалізації за допомогою стандартного програмного забезпечення такого як наприклад Matlab за допомогою графічного середовища Simulink

Ця технологія є доступною за рахунок програмного забезпечення, такого як моделювання у Matlab за допомогою графічного середовища Simulink. Доцільністю буде те, що серед інших математичних методів, таких як перетворення Фур'є, використання вейвлет-аналізу буде зумовлено більш точного вимірювання інтергармонік.

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових круп клієнтів	Вимоги до споживачів товару
1	2	3	4	5
1	Забезпечити, щоб функціонування обладнання не було під впливом порушень напруги, що виникають з мережі	Великі підприємства України, яких налічується близько 50 тисяч	Якість напруги в мережі і в кінцевого користувача в точці підключення може бути схильна до впливу в залежності від того: як мережа керується оператором мережі, як мережа визначається власником мережі, а також як спроектовані і використовуються всі пристрої, підключені до мережі	Важлива точність вимірювання окремих параметрів а також забезпечення, щоб функціонування обладнання не було під впливом порушень напруги, що виникають з мережі.
2	Відповідно до загальних умов поставки електроенергії дистриб'ютор і	Державний сектор (постачальники і дистриб'ютори	Оскільки у енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність,	Вирішення все зростаючої кількості завдань в



Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
	постачальник повинні гарантувати якість постачання, яке тягне за собою виконання стандартів і критеріїв, якість комерційних послуг; безперервність постачання електроенергії; якості напруги живлення.	електроенергії)	конкурентоспроможність» передбачено на першому етапі до 2020 року завершення імплементації Третього енергетичного пакета, що дозволить створити повноцінний ринок електроенергії відповідно до енергетичного законодавства ЄС і також виконати більшу частину заходів з інтеграції ОЕС України до енергосистеми ENTSO-E, то для України як одного з найбільших постачальників електроенергії у Східній Європі проблема невідповідності ЯЕ стандартам ЄС має	електроенергетиці з використанням сучасних математичних методів і технічних засобів, досить актуальним завданням є пошук шляхів удосконалення (модернізації) існуючих алгоритмів (методів) визначення якісних характеристик електроспоживання в загальному, і гармонійного аналізу, зокрема.

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
			пріоритетне значення. Через це національна економіка через погіршення ЯЕ може зазнати чималих економічних втрат у вигляді пені енергопостачальним компаніям та у зв'язку з розірванням контрактів на постачання електроенергії до країн ЄС.	

Таблиця 4.4 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Низька зацікавленість у дослідженні інтергармонік у порівнянні з гармоніками	Через низьку зацікавленість може спостерігатись застарілість методик вимірювання	Популяризація досліджень у цій галузі, через конференції, форуми, тощо

Таблиця 4.5 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення інтересу серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії	Через погіршення мереж викликане інтергармоніками спостерігається збільшення інтересу до проблем якості електричної енергії	Використання останніх наукових публікацій задля модернізації існуючих методик
2	Застосування цифрових фільтрів, а також аналогових аналізаторів форми сигналу	Використання інших методів вимірювання	Через використання інших технологій можливе збільшення швидкості і точності вимірювання інтергармонік

Таблиця 4.6 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3
Тип конкуренції - олігополія	Ця характеристика проявляється в тому, що перш за все товар є однорідним, це методи вимірювання показників якості електроенергії, виходячи з цього кількість продавців є	Проект пропонує окрім виявлення проблемних ділянок і інтергармонік у мережі також і шлях вирішення цих проблем

Продовження таблиці 4.6

1	2	3
	невеликою, а кількість покупців достатньою	
За рівнем конкурентної боротьби – національний	Проект орієнтовано на національні ринки: на великі підприємства, державний сектор та на постачальників і дистриб'юторів електроенергії	Розширення ринків з виходом на світові за рахунок запропонування вирішення проблем з урахуванням законодавства інших країн
За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Галуззю в даному випадку виступає методи вимірювання параметрів якості електроенергії, а саме інтергармонік	Оскільки конкуренція відбувається в одній галузі, можливими діями можуть бути розширення спектру вимірюваних параметрів якості електроенергії
Конкуренція за видом товарів – товарно-видова	Конкуренція проявляється у виборі серед методів, які розрізняються способами реалізації, наприклад за допомогою перетворень Фур'є, або як в даному випадку вейвлет-перетвореннями	Використання сучасних методів вейвлет-перетворень надає переваги над методами, які використовують перетворення Фур'є так як тільки це перетворення дозволяє оцінити достовірно і з високою точністю амплітудно-частотні та часові характеристики нестационарних сигналів.
За характером конкурентних	Цінова політика у даному сегменті має обмежений характер, через це значно	У розробленому методі впровадження більш точних досліджень з меншою похибкою

Продовження таблиці 4.6

1	2	3
переваг – нецінова	краще зосередитись на покращенні якісних характеристик розробленого методу визначення інтергармонік	
За інтенсивністю – марочна	Марочна політика дозволяє управляти рівнем доданої вартості товару, збільшувати марочний капітал, підвищувати конкурентоздатність проекту	Створення поінформованості цільової аудиторії, підтримки зацікавленості за рахунок чого проходить забезпечення сталого попиту, підтримання інтересу та нагадування споживачам про дану торгову марку

Таблиця 4.7 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти
	1	2	3	4
	Методи засновані на прямих перетвореннях Фур'є Параметричні методи Рекурсивні методи	Бар'єром на мою думку можуть бути законодавчі обмеження, оскільки з виходом на ринок іншої країни необхідно спиратись на стандарти які там існують	Концентрація постачальників	Контроль якості

Продовження таблиці 4.7

Висновки	1	2	3	4
	На даний момент конкуренція серед методів визначення інтергармонік є незначною	Можливістю виходу на ринок є запропонування більш точних і швидких методів заснованих на нормативній базі країни	Постачальник не диктує умови на ринку	Надається перевага найбільш точним і швидким методам, оскільки від цього залежить якість послуг, які може надати клієнт з використанням даної методики

Таблиця 4.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	2	3
1	Динаміка галузі	Оскільки галузь інтергармонік є на даний момент не достатньо дослідженою, і лише поступово починають виходити наукові

Продовження таблиці 4.8

1	2	3
		публікації з цього питання, використання новітніх методів оцінки, таких як вейвлет-перетворення, зумовлює значущість цього фактора
2	Бар'єри проникнення	Через законодавчі обмеження можливістю виходу на ринок є запропонування біль точних і швидких методів заснованих на нормативній базі країни

Таблиця 4.9 – *SWOT*-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: при застосуванні вейвлет-перетворення ширина вейвлета в десятки разів менше ширини одного періоду основної частоти і свідомо змінюється з метою виявлення найдрібніших нестационарних (сингулярностей)	Слабкі сторони: ускладнено моделювання і вимірювання спотворених сигналів, непостійність частот і амплітуд інтергармонік, змінність періодичності хвиль; дуже велика чутливість до явища спеткрального витоку
Можливості: через погіршення мереж викликане інтергармоніками спостерігається збільшення інтересу серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії; застосування інших принципів аналізу, таких як застосування цифрових фільтрів, а також аналогових аналізаторів форми сигналу	Загрози: дуже низька зацікавленість у дослідженні у порівнянні з гармоніками

Таблиця 4.10 – Альтернатива ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Великі підприємства України, яких налічується близько 50 тисяч	Галузь інтеграмонік є малодослідженою, але зацікавленість зростає задля поліпшення	Конкуренція майже відсутня оскільки такі проекти є «першопрохідцями»	Через невелику конкуренцію на ринку є простою
2	Державний сектор (постачальники і дистриб'ютори електроенергії)	показників якості електроенергії		

Таблиця 4.11 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	2	3	4
Розробка методу з використанням загальновикростовуваних методів	Компанія буде зосереджена на одному сегменті, виходячи з цього обирається	Більша адаптивність методу, простота використання, через обізнаність галузі у минулому використанні методів	Базовою стратегією буде виступати стратегія спеціалізації оскільки вона

Продовження таблиці 4.11



1	2	3	4
	стратегія концентрованого маркетингу		передбачає концентрацією на одному цільовому сегменті, що в даному випадку буде визначенням інтергармонік на ринку визначення показників якості електроенергії

Таблиця 4.12 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	2	3	4
Оскільки як і методи розроблення, такі як	Компанія за рахунок виходу з		

Продовження таблиці 4.12

1	2	3	4
вейвлет-аналіз, так і галузь вимірювання інтергармонік є доволі новими, то можна вважати проект «першопрохідцем»	національного рівня конкурентної боротьби до світового буде збільшувати кількість споживачів	Компанія не буде копіювати основні характеристики товару конкурента	В даному випадку приймається стратегія заняття конкурентної ніші, а саме визначення інтергармонік, оскільки вплив інтергармонік є малодослідженою галуззю

Таблиця 4.13 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту
Вимогами виступає точність і швидкість, а також доцільність і легка реалізованість запропонованих методів вирішення	Базовою стратегією буде виступати стратегія спеціалізації оскільки вона передбачає концентрацією на одному цільовому сегменті, що в даному випадку буде визначенням інтергармонік на ринку визначення показників якості електроенергії	Адаптивність, унікальність, інноваційність

Таблиця 4.14 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфікація поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти шукають найбільш точні, прості і швидкі методи	Поширення за допомогою участі у форумах та конференціях.	Ключовими позиціями виступають інноваційність методу вимірювання, ефективність запропонованих шляхів вирішення	Донести до клієнтів, що метод буде виступати оптимальним рішенням задля поліпшення показників якості електроенергії	Спрямованість реклами від знання купівельних потреб до конкретного вирішення проблем споживача, а саме проблем ПЯЕ

### Висновки до розділу

Наразі попит на вирішення проблем параметрів якості електричної енергії буде поступово зростати, оскільки, як і приватні підприємства, так і постачальники електричної енергії, збільшують зацікавленість у мінімізації втрат від неякісної електричної енергії. Тому запропонований проект буде перспективи впровадження, так як і окрім основних функцій ідентифікації завад, таких як інтерграмоніки, має й інші функції спрямовані на визначення проблемних ділянок і запропонування шлях їх вирішення. Подальша імплементація з огляду на функціонал проекту є доцільною.

## ВИСНОВКИ

1. Якість електроенергії – це основоположна сукупність властивостей електроенергії, що визначають вплив на електрообладнання і регулюються за допомогою параметрів якості електричної енергії. Однак електрообладнання генерує в мережу завади, які можуть погіршувати показники якості електроенергії, одними з яких є інтергармоніки. Тому проблема недостатності дослідження для визначення наразі стає все актуальнішою.

2. Інтергармоніки спостерігають як одне з додаткових навантажень до гармонік. Такими навантаженнями є статичні перетворювачі частоти, синхронні каскадні перетворювачі, прилади з регульованою швидкістю для індукційних чи синхронних двигунів, печі чи інше термічне обладнання, усі ці навантаження не будуть працювати з частотою синхронною до основної частоти. Ці проблеми пов'язані з інтергармоніками потребують перш за все визначення для подальшого вирішення.

3. Окрім стандартних проблем, які виникають при появі гармонік, перегрів чи зниження корисного ресурсу, виникає багато інших: значні термічні ефекти; низькочастотні коливання механічної системи, миготіння світла, завади сигналів керування і захисту, перевантаження високою частотою пасивного паралельного фільтру, телекомунікаційні завади, акустичні збурення, насичення трансформатора струму, синхронні коливання, коливання напруги, несправності систем дистанційного управління, помилкове спрацювання тиристорної апаратури, зменшення строку служби асинхронних двигунів. Ці проблеми значно впливають на економічну ефективність електроспоживання.

4. Розглянувши існуючі методи визначення інтергармонік для досягнення більш прийнятних результатів у визначенні інтергармонік рекомендується застосовувати інтергармонічні групи, через недосконалість методів заснованих на використанні перетворень Фур'є, виражену у неможливості синхронізації з основною частотою.

5. Для найефективнішого дослідження інтергармонічних груп доцільно використовувати пакетні вейвлети для отримання збалансованого дерева вейвлет-перетворень – бінарного дерева. Оскільки за рахунок того, що пакетне вейвлет-перетворення є адаптивним – це не потребує додаткових відомостей про статистичні відомості сигналів і є більш точним з мінімальною кількістю вейвлет-коефіцієнтів через вибір оптимальної форми дерева розкладу. Завдяки цьому при використанні інтергармонічних груп досягається синхронізація з основною частотою для визначення інтергармонік.

6. Оскільки зацікавленість у вирішенні питань пов'язаних з інтергармоніками поступово збільшується то розроблення способу їх визначення з подальшою комерціалізацією за для ідентифікації інтергармонік і зменшення негативних наслідків є доцільним.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаркин А.Ф. Нормативные и технические аспекты обеспечения стандартных характеристик напряжения в системах электроснабжения Украины / А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958). – С. 76-83.
2. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначеності ( EN 50160:2010, IDT) : ДСТУ EN 50160: 2014. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.Мінекономрозвитку України, 2014. – 33 с. – (Національний стандарт України)
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях : [3-е издание, переработанное и дополненное] / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с. – (Экономия топлива и электроэнергии).
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 – [Чинний від 1999-01-01]. – Технический комитет по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств. – 33 с. – (Межгосударственный стандарт)
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий : [4-е издание переработанное и дополненное] / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
7. Мельник Л.Г. Економіка енергетики : [підручник] / Л.Г. Мельник, І.М. Сотник. – Суми: Університетська книга, 2015. – 378 с.
8. Сапунов М. В. Вопросы качества электроэнергии / М. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2001. — № 4.

9. Попков О.З. Основы преобразовательной техники. Автономные преобразователи. Конспект лекций : [Учебное пособие] / О.З. Попков. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 64 с.
10. Лопатин А.А. Преобразовательная техника : [Конспект лекций] / А.А. Лопатин. – Красноярск: ИПЦ ПИ СФУ, 2007. – 144 с.
11. Гельман М.В. Преобразовательная техника : [учебное пособие] / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
12. O’Connell K. Heating effects Through Harmonic Distortion on Electric Cables in the Built Environment: дис. ... доктора. філософії : 23.07.2013 / Kevin O’Connell. – Dublin, 2013. – 237 p.
13. Сапунов М. В. Вопросы качества электроэнергии / М. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2001. — № 5.
14. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наукова думка, 2005. – 211 с.
15. Пивняк Г.Г. Интергармоніки в системах електропостачання / Г.Г. Пивняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Науковий вісник НГУ. – 2017. – №6. – С.109-114.
16. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с. – (Экономия топлива и электроэнергии).
17. Shah N. Harmonics in power systems Causes, effects and control // Whitepaper [Електронний ресурс]. – USA: Siemens Industry, Inc. – 2013. – Режим доступу: <http://usa.siemens.com/lv-drives>
18. Білінський Й.Й. Електронні системи : [навчальний посібник] / Й.Й. Білінський, К.В. Огороднік, М.Й. Юкиш. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 208 с.
19. Коленов С.О. Цифрова обробка інформації : [Методичний посібник до лабораторного практикуму для студентів радіофізичного факультету] – Київ: Радіофізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2008. – 56 с.

20. 11. Воробьев В.И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В.И. Воробьев, В.Г. Грибунин. – С.-Петербург: ВУС, 1999. – 204 с.
21. Ривкин Г.А. Преобразовательная техника / Г.А. Ривкин. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.
22. Mehrdad M. Influence of Voltage and Current Harmonics on Behavior of Electric Devices / M. Mehrdad, E.K. Stanek, A.S. Jannati – John Wiley and Sons Inc., 2012. – 136 p.
23. Soltani H. Interharmonics Analysis and Mitigation in Adjustable Speed Driver: дис. ... доктора. філософії : 28.02.2016 / Hamid Soltani. – Aalborg, Denmark, 2013. – 133 p.
24. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи : [Учеб. для вузов ж.-д. трансп.] / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
25. Hanzelka Z. Power Quality Application Guide : [Harmonics Interharmonics] / Z.Hanzelka, A. Bien. – AGH University of Science and Technology, 2004. – 22 p.
26. Волошко А.В. Щодо застосування вейвлет-перетворення для визначення та оцінки показників якості електричної енергії / А.В. Волошко, А.Л. Харчук // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №1. – С. 30-34.